

高校无人机应用技术专业新形态系列教材（总主编：何先定 刘建超 李屹东）

无人机

电气系统

（活页式）

主 编 姜 舟
副主编 王晋誉 李志异
参 编 严向峰 王思源



课程思政



活页式



新形态



课件



微课



校企合作

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

无人机电气系统 / 姜舟主编. —成都: 西南交通大学出版社, 2022.6
ISBN 978-7-5643-8713-6

I. ①无… II. ①姜… III. ①无人驾驶飞机—电气系统—高等职业教育—教材 IV. ①V279

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2022) 第 099456 号

Wurenji Dianqi Xitong

无人机电气系统

主编 姜 舟

责任编辑 何明飞

封面设计 吴 兵

出版发行 西南交通大学出版社
(四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号
西南交通大学创新大厦 21 楼)

邮政编码 610031

发行部电话 028-87600564 028-87600533

网址 <http://www.xnjdcbs.com>

印刷 四川玖艺呈现印刷有限公司

成品尺寸 185 mm × 260 mm

印张 14.75

字数 307 千

版次 2022 年 6 月第 1 版

印次 2022 年 6 月第 1 次

定价 49.00 元

书号 ISBN 978-7-5643-8713-6

课件咨询电话: 028-81435775

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

高校无人机应用技术专业新形态系列教材

编写委员会

主任委员

刘建超 国家教学名师 成都航空职业技术学院

副主任委员

何敏 云影系列无人机总设计师 成都飞机工业(集团)有限责任公司
李屹东 翼龙系列无人机总设计师 中航(成都)无人机系统股份有限公司
李中华 国家英雄试飞员 中国人民解放军空军指挥学院
冯文全 北京航空航天大学
任斌 成都纵横自动化技术股份有限公司
董秀军 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室
张秦罡 自然资源部第三航测遥感院

总主编

何先定 刘建超 李屹东

执行编委(按拼音排序)

陈世江	重庆电子工程职业学院	江启峰	西华大学航空航天学院
李乐	国网乐山供电公司	李兴红	成都理工大学工程技术学院
刘清杰	四川航天职业技术学院	卢孟常	贵州航天职业技术学院
王福成	黑龙江八一农垦大学	王晋誉	上海民航职业技术学院
王利光	成都纵横大鹏无人机科技有限公司	王永虎	重庆交通大学
魏永峭	兰州理工大学	吴道明	重庆航天职业技术学院
许云飞	成都航空职业技术学院	徐绍麟	云南林业职业技术学院
查勇	天府新区通用航空职业学院	周军	厦门大学

委员(按拼音排序)

陈宗杰	成都航空职业技术学院	戴升鑫	成都航空职业技术学院
邓建军	成都航空职业技术学院	段治强	成都航空职业技术学院
范宇航	成都航空职业技术学院	房梦旭	成都航空职业技术学院
冯成龙	成都航空职业技术学院	付鹏	成都纵横大鹏无人机科技有限公司
何达	成都航空职业技术学院	何国忠	四川航天中天动力装备有限责任公司
何云华	成都工业学院	胡浩	天府新区航空旅游职业学院
姜舟	成都航空职业技术学院	蒋云帆	西华大学航空航天学院

李 恒	成都航空职业技术学院	李林峰	成都纵横大鹏无人机科技有限公司
李 艳	成都航空职业技术学院	李宜康	成都航空职业技术学院
李懿珂	成都纵横大鹏无人机科技有限公司	李志鹏	中航（成都）无人机系统股份有限公司
李志异	成都航空职业技术学院	廖开俊	中国人民解放军空军第一航空学院
刘 驰	四川航天中天动力装备有限责任公司	刘 奔	成都纵横大鹏无人机科技有限公司
刘佳嘉	中国民用航空飞行学院	刘 健	山西机电职业技术学院
刘 静	重庆科创职业学院	刘明鑫	成都航空职业技术学院
刘 霞	重庆航天职业技术学院	马云峰	成都纵横大鹏无人机科技有限公司
梅 丹	中国人民解放军海军工程大学	牟如强	成都理工大学工程技术学院
潘率诚	西华大学	屈仁飞	成都西南交大研究院有限公司
瞿胡敏	四川傲势科技有限公司	任 勇	重庆电子工程职业学院
沈 挺	重庆交通大学	宋 勇	四川航天中天动力装备有限责任公司
唐 斌	成都航空职业技术学院	田 园	成都航空职业技术学院
王 聪	成都航空职业技术学院	王国汁	中航（成都）无人机系统股份有限公司
王 进	成都纵横大鹏无人机科技有限公司	王朋飞	西安航空职业技术学院
王 强	成都航空职业技术学院	王泉川	中国民用航空飞行学院
王思源	成都航空职业技术学院	王文敬	中国民用航空飞行学院
王 旭	成都航空职业技术学院	王 洵	成都航空职业技术学院
魏春晓	成都航空职业技术学院	吴 可	重庆交通大学
吴 爽	中航（成都）无人机系统股份有限公司	谢燕梅	成都航空职业技术学院
邢海涛	云南林业职业技术学院	熊 斌	西南大学
徐风磊	中国人民解放军海军工程大学	许开冲	成都纵横自动化技术股份有限公司
闫俊岭	重庆科创职业学院	严向峰	成都航空职业技术学院
杨 芳	成都航空职业技术学院	杨谨源	中航教育科技（天津）有限公司
杨 琴	成都理工大学工程技术学院	杨 锐	成都纵横自动化技术股份有限公司
杨少艳	成都航空职业技术学院	杨 雄	重庆航天职业技术学院
杨 雪	成都航空职业技术学院	姚慧敏	成都航空职业技术学院
尹子栋	成都航空职业技术学院	游 奎	成都纵横大鹏无人机科技有限公司
张 捷	贵州交通技师学院	张 梅	成都农业科技职业学院
张 松	四川零坐标勘察设计有限公司	张惟斌	西华大学
张 伟	成都纵横大鹏无人机科技有限公司	赵 军	重庆电子工程职业学院
郑才国	成都理工大学工程技术学院	周 彬	重庆电子工程职业学院
周佳欣	成都航空职业技术学院	周仁建	成都航空职业技术学院
邹晓东	中航（成都）无人机系统股份有限公司		



前言

PREFACE

无人机最早在 20 世纪 20 年代出现，起初主要在军用领域使用，虽有一百多年的发展史，但直到近十年，随着人工智能技术的逐步完善、航空技术的迅速发展，无论是军用领域还是民用领域，无人机都得到了广泛的应用，国内对无人机的研发越来越重视，在全球无人机领域也实现了从追赶到超越的转变，无人机成功“飞”到人们身边。

国内众多高职院校纷纷开设无人机应用技术相关专业，主要面向企事业单位培养技术技能人才，教学载体涵盖固定翼无人机、旋翼无人机等，但与教学配套的教材储备相对薄弱。尤其对于军民融合类高职院校更是难以选到合适的教材。考虑到无人机的气动布局、飞行速度、用途等诸多因素，本书结合 1+X 无人机组装与调试职业技能标准，融入课程思政元素，以固定翼无人机为主要载体，以讲解无人机电气系统的基本原理和组成结构为主，以任务为牵引，创设工作情景，要求学生掌握飞机电源系统的组成并了解其在飞机运行中的工作情况；掌握发电机的结构和工作原理、调压、供电方式、控制与故障保护；熟悉机外照明系统的组成及工作原理等。这些都要求学生具备扎实的专业基础理论知识和专业知识，具有一定的理论联系实际的应用能力，为今后的工作提供相应的专业理论和实践知识。

本书由成都航空职业技术学院姜舟担任主编，上海民航职业技术学院王晋誉和成都航空职业技术学院李志异担任副主编，模块一由王晋誉和李志异编写，模块二、模块三和模块四由姜舟编写，模块五由王思源和严向峰编写，姜舟对本书的编写思路和内容进行了总体策划，并对全书进行统稿。

鉴于编者理论水平和实践经验有限，书中不妥之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者

2021年12月
于成都航空职业技术学院

目录

CONTENTS

预备知识	001
模块 1 飞机电路控制与保护装置	012
任务 1 电路连接装置	012
任务 2 电路控制装置	023
任务 3 电路保护装置	039
模块 2 飞机电源系统	046
任务 1 航空蓄电池	046
任务 2 飞机直流发电机	071
任务 3 飞机交流发电机	085
任务 4 交流电源系统基本形式	093
任务 5 地面电源	105
任务 6 专用电源	111
任务 7 飞机电能变换设备	114
模块三 飞机配电系统	121
任务 1 飞机电网的线制和配电方式	121
任务 2 直流发电机的电压调节	130
任务 3 直流电源的并联运行及控制与保护	138
任务 4 交流发电机电压调节	149
任务 5 交流电源的并联运行及控制与保护	154
任务 6 电磁干扰与电磁兼容性	167
模块 4 飞机供电系统应用实例	172
任务 1 直流供电系统实例	172
任务 2 交流供电系统实例	179

模块 5	用电设备	190
任务 1	机外灯光照明设备	190
任务 2	电力传动设备	197
任务 3	飞机发动机电力起动设备	213
参考文献	221
附录 1	缩略语表	222
附录 2	常用单位及换算关系	226

预备知识

无人机电气系统是无人机系统的重要飞行保障系统，要完成飞行任务几乎每个分系统都要用到电源，几乎所有的设备都离不开电气自动化的控制。

知识点 1 无人机与无人机系统

“无人机”是无人驾驶航空器的简称，英文缩写为“UAV”（Unmanned Aerial Vehicle），是依靠无线遥控设备或自备的程序控制装置操纵的不载人飞机。与有人机相比，无人机上没有驾驶舱，但安装有自动驾驶仪、程序控制装置等设备。地面、舰艇或母机遥控站人员通过雷达等设备，对无人机进行定位、遥控、跟踪、遥测以及实时数据传输，可以在无线电遥控下，像有人机一样起飞或用助推火箭发射升空，也可由母机带到空中投放飞行。回收时，可采用有人机着陆方式一样进行自动着陆，也可以通过遥控伞降或拦网降落。无人机具有体积小、造价低、无人员伤亡、对环境要求低、生存能力强和用途广泛等特点。图 0.1.1 所示为有人机，图 0.1.2 所示为无人机。



图 0.1.1 有人机



图 0.1.2 无人机

无人机系统（Unmanned Aircraft System, UAS）是确保无人机能正常运行的整个系统。所谓“系统”是由若干个相互联系、作用以及依存的组成部分结合而成、具有特定功能的有机整体。无人机系统主要由无人机平台、任务载荷、数据链、指挥控制、发射与回收、保障与维修等分系统组成，各分系统组成和功能如下：

1. 无人机平台分系统

无人机平台分系统包括机体结构、动力系统、供电系统、环控系统、起落架系统、机外照明系统、导航与飞行控制子系统等。无人机平台分系统是执行任务的载体，它携带任务载荷，飞行至目标区域完成要求的任务。

2. 任务载荷分系统

任务载荷分系统是，为完成作业飞行特定任务而搭载在无人机上的设备或装置，它直接决定了无人机的功能，主要载荷包括侦察设备、通信设备、武器等。

3. 数据链分系统

数据链分系统包括无线电遥控或遥测设备、信息传输设备、中继转发设备等。数据链分系统通过上行通信链路，给无人机发送指令，控制无人机飞行、操控所携带的各种任务载荷；同样，通过下行通信链路，无人机回传信息和图像到达操控人员面前。信息包括载荷数据、机上各分系统的状态信息（监控数据）、位置信息等。

4. 指挥控制分系统

指挥控制分系统完成指挥，作战计划制定，任务数据加载，无人机地面和空中工作状态监视和操纵控制以及飞行参数、态势和任务数据记录等任务。该分系统主要包括飞行操纵设备、综合显示设备、飞行航迹与态势显示设备、任务规划设备、记录与回放设备、情报处理与通信设备、与其他任务载荷信息的接口等。

5. 发射与回收分系统

发射与回收分系统是指与发射（起飞）和回收（着陆）有关的设备或装置，如发射车、发射箱、弹射装置、助推器、起落架、回收伞、拦阻网等。发射与回收分系统完成无人机的发射（起飞）和回收（着陆）任务。

6. 保障与维修分系统

保障与维修分系统主要完成无人机系统的日常维护，以及无人机的状态测试和维修等任务，主要有保障车、机体包装箱、手册等。

知识点 2 无人机的分类

目前，无人机相关技术飞速发展，用途广泛，种类繁多。由于其外形结构、质量、飞行速度、飞行高度、用途和空域等的巨大差异，出于不同的考量，无人机分类也会

不同，常用分类方式有以下几种。

1. 按用途分类

无人机按照不同的用途，可以分为军用无人机和民用无人机。其中，民用无人机通常又分为工业级无人机和消费级无人机。

军用无人机可以用作侦察监视、骗敌诱饵、电子对抗、通信中继、校射以及靶机等。它在现代战争中的作用和地位日渐突显，是空中军事力量重要的组成部分。早期出现的靶机，可用于地面防空、空中格斗武器的试验与训练。随着无人机技术发展，现在无人机在军事上多用于侦察监视、骗敌诱饵。无人侦察机（图 0.2.1）可以深入阵地前沿和敌后数百千米，甚至更远的距离，依靠装在机上的照相机、摄影机、红外扫描器以及雷达等设备，完成各种侦察和监视任务；作为诱饵无人机，主要协同其他电子侦察设备进行诱骗侦察。除此之外，军用无人机还能对敌方通信系统进行干扰，使其通信设备受损；作为一种空中运载工具，无人机还可以携带武器，对敌军地面军事目标进行打击。军用无人机对飞行高度、速度、灵敏度、智能化等有着更高的要求，具有隐蔽性好、无人员伤亡、使用限制少等特点。

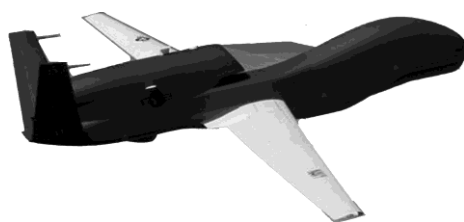


图 0.2.1 无人侦察机

工业级无人机广泛应用于各行各业的日常工作中。例如，电力巡检、农业植保（图 0.2.2）、物流、交通监控、消防救援、石油管道巡检、野生动物观察、传染病监控、地形测绘、新闻报道、影视拍摄等领域。一般根据不同需求搭载不同设备，如大气探测器、高光谱相机、激光雷达、红外热像仪等。与消费级无人机相比，在起飞重量、飞行时间、稳定性方面均有提高，技术更加复杂，目前主要以多旋翼、固定翼和混合式无人机为主。工业级无人机主要面向行业用户定制生产，一般产量不大且售价较高。

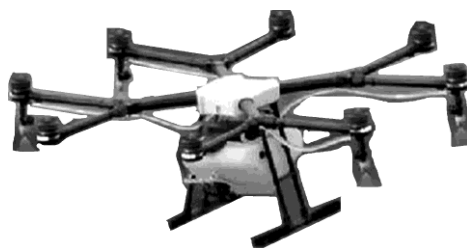


图 0.2.2 植保无人机

消费级无人机面向个人用户，它借助无人机搭载高清摄影机，在无线遥控操作

下进行航拍。目前，消费级无人机一般采用成本较低的多旋翼平台，其中以四旋翼无人机（见图 0.2.3）使用居多，对于摄影爱好者和普通消费者来说，容易操控、便携且价格适宜，主要用于航拍、跟拍等娱乐场景。



图 0.2.3 消费级无人机

2. 按平台构型分类

按照平台构型主要分为固定翼无人机、旋翼无人机及其他类型。旋翼无人机又分为无人直升机和多旋翼无人机。其他类型无人机包括伞翼无人机、扑翼无人机和无人飞艇等。

固定翼无人机是通过人工遥控或者自备的程序控制其动力系统，来实现飞行的不载人飞机，是军用和多数民用无人机的主流平台。最常见的布局有常规布局、双尾撑布局和无尾布局等，如图 0.2.4 所示。微型化和长航时是固定翼无人机发展的趋势，微型化固定翼无人机只有手掌大小，长航时固定翼无人机续航时间在 10 h 以上，能够搭载多种遥感传感器，其起飞方式有滑行、弹射、车载、火力助推以及飞机投放等；降落方式有滑行、伞降以及撞网等。固定翼无人机具有续航时间长、飞行效率高、载荷大、飞行稳定性好等特点。

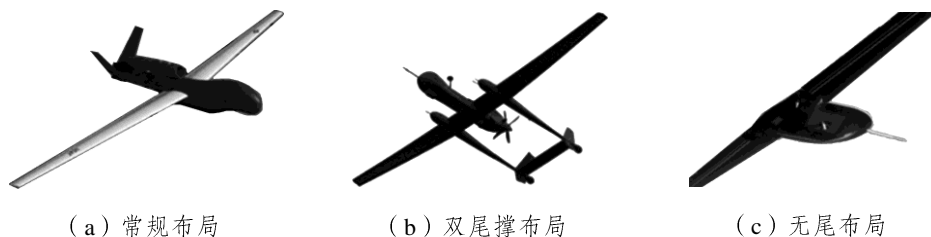


图 0.2.4 固定翼无人机

无人直升机是可以垂直起降、灵活性较强的无人机平台（图 0.2.5）。在构型上属于旋翼无人机，在功能上属于垂直起降通用航空器。与固定翼无人机相比，它具有垂直起降（即不需要跑道）、空中悬停、任意方向飞行、起飞着陆场地小等特点。但其结构相对复杂、操控难度较大，所以实际应用还比较少。与有人直升机相比，它具有体积小、造价低、无人员伤亡和战场生存力强等特点。在民用方面，无人直升机在交通监控、大气监测、资源勘探、电力巡检、消防救援等方面的应用前景较大。在军用方面，无人直升机在侦察、监视、目标截获、诱饵、攻击、通信中继等方面的应用前景

较为广泛。



图 0.2.5 单旋翼无人直升机

多旋翼无人机是一种具有三个及以上旋转轴的无人直升机（图 0.2.6），是消费级无人机和工业级无人机的首选平台，灵活性在固定翼无人机和无人直升机之间，具有结构简单、容易操控、无机械磨损、价格便宜等特点。

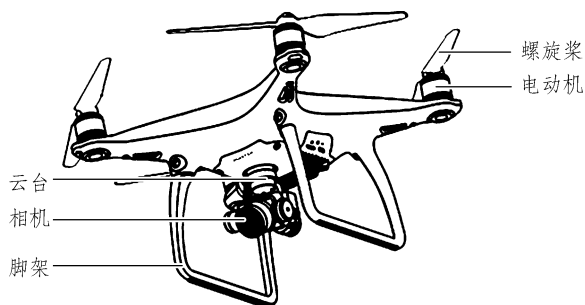


图 0.2.6 多旋翼无人机

3. 按运行管理分类

按照民用无人机驾驶员的资质管理，无人机分类见表 0.2.1。

表 0.2.1 分类等级

分类	空机重量/kg	起飞全重/kg
I	0<W≤0.25	
II	0.25<W≤4	1.5<W≤7
III	4<W≤15	7<W≤25
IV	15<W≤116	25<W≤150
V	植保类无人机	
XI	116<W≤5700	150<W≤5700

XII	$W > 5700$
-----	------------

在实际运行中,当Ⅲ、Ⅳ、Ⅺ类分类有交叉时,按照较高要求的一类分类;对于串、并列运行或者编队运行的无人机,按照总重量分类;地方政府(如公安部门)对于Ⅰ、Ⅱ类无人机重量界限低于本表规定的,以地方政府的具体要求为准。

4. 按活动半径分类

无人机按照活动半径可分为超近程无人机、近程无人机、短程无人机、中程无人机和远程无人机。超近程无人机的活动半径一般在 15 km 以内;近程无人机的活动半径一般在 15 ~ 50 km;短程无人机的活动半径一般在 50 ~ 200 km,主要为作战指挥人员提供 200 km 范围内的情报或者为炮兵射靶使用;中程无人机的活动半径在 200 ~ 800 km,主要用于战场环境侦察,毁伤效果评估等;远程无人机的活动半径一般大于 800 km,常用于敌纵深监视与侦察,为实现空地一体战的敌纵深打击提供条件,该类无人机能在高对抗强度战场生存,具有精确制导、目标定位、自动跟踪目标等作战能力。

5. 按任务高度分类

无人机按照任务高度可分为超低空无人机、低空无人机、中空无人机、高空无人机和超高空无人机。超低空无人机的飞行高度一般在 100 m 以下;低空无人机的飞行高度一般在 100 ~ 1 000 m;中空无人机的飞行高度一般在 1 000 ~ 7 000 m;高空无人机的飞行高度一般在 7 000 ~ 18 000 m;超高空无人机的飞行高度一般大于 18 000 m。

6. 按速度分类

无人机按照速度可分为低速无人机、亚音速无人机、跨音速无人机、超音速无人机和高超音速无人机。低速无人机的飞行速度一般小于 0.3 Ma (Ma 为马赫数);亚音速无人机飞行速度一般在 0.3 ~ 0.7 Ma 之间;跨音速无人机速度一般在 0.7 ~ 1.2 Ma;超音速无人机速度一般在 1.2 ~ 5 Ma;高超音速无人机速度一般大于 5 Ma。

知识点 3 无人机电气系统组成和作用

无人机电气系统由供电系统和用电设备组成。供电系统是指在飞机上电能产生、分配与传输至用电设备输入端之间的部分,通常包括电源系统和输配电系统。供电系统的功能是向全机各用电系统或设备提供满足预定设计要求的电能,包括足够的电容量和可靠的输配电,并保证供电质量符合要求。

1. 电源系统

为了保证飞机在各种情况下的正常供电,按照电源的来源和用途,飞机电源系统由主电源、辅助电压、应急电源、二次电源以及地面电源等组成。

主电源：由航空发动机驱动的发电机、电源控制保护设备等构成。正常情况下由主电源向全机负载供电。

辅助电源：当主电源故障或航空发动机不工作时（如地面勤务时），靠辅助电源供电。

应急电源：当主电源和辅助电源均故障时，蓄电池或应急发电机即成为应急电源，给飞机上的关键负载供电。满足应急蓄电池供电需求的同时，也要满足空中、地面起动发动机的供电要求。应急发电机相关内容，请扫描二维码查看。



应急发电机

二次电源：将主电源的一种形式或规格的电转变为另一种形式或规格的电来满足不同用电设备的需求。

地面电源：飞机在地面时，由地面电源车或逆变电源向飞机供电，可以满足飞机地面检查、维护、照明以及起动发动机用电。

专用电源：专用电源包括飞管电源控制盒，它保证飞管计算机冗余度、不间断供电。

2. 输配电系统

飞机输配电系统（简称配电系统），其作用是将电能可靠而有效地传输到各个用电系统和设备，实现电功率的合理分配，在电源系统发生故障时，保证重要用电设备优先供电，应急情况下保证关键负载的供电。该系统通常由下列设备或装置组成：

（1）导线、电缆以及连接装置，起传输电能的作用，包括汇流条、接线板、配电板、连接器等。

（2）电路控制装置（称配电装置），起控制用电设备和电源运行的作用，包括开关、接触器、继电器和固态功率控制器等。

（3）电路保险装置，起防止导线和设备遭受短路与过载危害的作用，包括各种熔断器、自动保险开关等。

（4）电路检测设备，包括各种指示、显示仪表及信号装置等。

（5）抗干扰装置，包括各种滤波器、防波套及其他屏蔽装置等。

根据配电控制管理中心对功率开关设备的控制管理方式，配电系统的控制方式可分为常规式、遥控式和固态式三类。常规式的配电功率线全部引入机身的中央配电装置，早期的有人机和目前的某些中大型固定翼无人机采用此种控制方式；遥控式的汇流条靠近用电设备，由空勤人员或指令控制中心发出的遥控信号通过功率控制器（如接触器）对用电设备进行控制，座舱内只引入控制线，目前现代大、中型民航客机均采用此类控制方式，以减轻飞机电网的重量；固态式是由计算机控制的一条多路传输总线传递全部信息和控制信号，再由固态功率控制器对用电设备进行控制，这种控制方式取消了众多的控制线，因此减轻了导线重量，提高了供电的可靠性和自动化程度，目前正在发展中。按飞机配电系统的配电方式，飞机配电系统又可分为集中式、分散式和混合式三种。集中式配电系统是所有电源产生的电能都输送到中央配电装置，然

后再由该配电装置将电能分配到不同负载。分散式配电系统是各个电源产生的电能分别输送到各个配电装置，然后由各个配电装置给靠近它的用电设备供电。混合式配电系统由电源所产生的电能都输到中央配电装置，除了中央配电装置外，还有若干二级配电装置，它们安装在飞机上的不同部位，各用电设备可分别由上述两种配电装置供电。此外，飞机电网还可按电压分为低压电网和高压电网（60 V 以上）；根据电流类型来分，有直流电网和交流电网；就交流电网来说又有单相和三相之分。根据飞机电网的线制来分，则有单线、双线、三线、四线等几种。

3. 用电设备

用电设备（又称负载）是指飞机上使用电能进行工作的设备。在用电设备中电能被转换成机械能、热能、光能、声能或化学能，以达到某种特定的目的。按设备对保证飞行安全的重要程度，用电设备可分为飞行关键负载、任务关键负载、通用负载三类。

1) 飞行关键负载

飞行关键负载是确保飞机安全返航或就近降落（包括维持可操纵飞行）所必需的最低限度的用电设备，如飞行控制、发动机的起动、导航及通信设备、起落架收放等。飞行关键负载关系到飞行安全，为此，必须将其配置在重要的负载汇流条上。正常供电期间由主电源供电，当主电源失效转入应急供电时，应能自动或人工地转为由应急电源供电。

2) 任务关键负载

任务关键负载是保证飞机安全飞行和完成特定任务所需要的用电设备，是机上电能的主要使用者。但在飞机应急供电时，为确保飞行关键负载得到供电，将视故障严重程度，切除部分以至全部任务关键负载。

3) 通用负载

通用负载是与飞行安全无关的负载，为完成某项任务或满足某项要求而设置的用电设备。通用负载不工作时，并不危及飞行安全，故当主电源发生局部故障而提供的功率有限时，为确保对飞行关键负载和任务关键负载的供电，根据故障严重程度，将首先切除部分以至全部通用负载。

此外，按其用途不同，通常用电设备也分为以下几类。

- (1) 电动机构，主要用于飞机的操纵机构，如襟翼、舵面调整片、起落架收放、电动泵和电磁活门等。
- (2) 发动机的起动、喷油和点火设备，如电力起动机、起动箱、起动自动定时器、高能点火装置和电嘴等。
- (3) 灯光系统和加温防冰设备，如各种照明灯、信号灯、电加温和防冰设备。
- (4) 电子设备，如无线电通信、导航设备、雷达设备等。

知识点 4 飞机电源系统的发展

飞机电源系统经历了低压直流、交流、高压直流的发展过程。其中，交流电源系统还经历了变速变频、恒速恒频、变速恒频交流电源系统三个阶段。

1. 低压直流电源系统

低压直流电源系统是飞机上最早采用的电源系统,自 1914 年飞机上第一次使用航空直流发电机以来,飞机直流电源系统经历了一百多年的发展过程,其额定电压从 6 V、12 V,逐步发展到额定电压为 28 V(电压调节点)低压直流电源系统,并且一直沿用到现在。二次电源是由旋转变流机或静变流器把低压直流电转变为单相或三相交流电。飞机上还要安装蓄电池作为应急电源。大型飞机上由辅助动力装置驱动直流发电机作为辅助或备用电源。早期采用这种电源系统的机型有安-2、运-5、里-2、伊尔-14 及 C-46 等。这些飞机的直流电源系统主要由直流发电机、电压调节器、保护器、滤波器及蓄电池等组成,这些飞机均采用活塞式发动机,发动机通过减速器直接驱动直流发电机,产生直流电源。电源系统的控制方式多采用接触器和继电器进行人工控制。近年来,随着电力电子技术的发展,无刷直流发电机和静止变流器等设备的出现,其高转速和高性能导磁材料的使用使电机的体积、重量大大减轻。同时,新型直流起动发电机采用固态发电机控制保护装置,除了具备调压、故障保护和控制功能以外,还具备机内自检等功能,使直流发电系统更具有优越的性能。因此,在小型支线客机和中大型固定翼无人机上得到了广泛使用。

2. 交流电源系统

随着机载电子设备和电力传动装置不断增加,机上用电量大大增加,对供电质量要求不断提高,促进了飞机交流电源系统的发展。交流电源系统可以分为变速变频交流电源系统、恒速恒频交流电源系统、变速恒频交流电源系统三类。

1) 变速变频交流电源(VSVF)

变速变频交流电源系统是最早在飞机上使用的交流电源系统。变频交流电源系统由飞机发动机通过减速器直接驱动交流发电机发电,输出的交流电频率随发动机转速的变化而变化,其结构如图 0.4.1 所示。

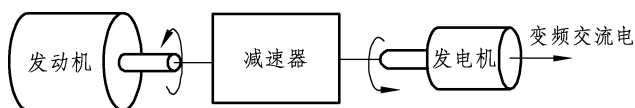


图 0.4.1 VSVF 结构示意图

它主要用于装有涡轮螺旋桨发动机和涡轮轴发动机的飞机上。这种系统不需要恒速传动装置,它的结构简单、重量轻、可靠性高,维护工作量相对较小。不足之处,由于输出的交流电频率是变化的,对电机类用电设备要求随之提高。在需要恒频交流

电的时候，由逆变器来提供。

2) 恒速恒频交流电源 (CSCF)

1946年，美国发明恒速传动装置 (Constant Speed Drive, CSD)，简称恒装，开辟了 CSCF 时代，是目前大型喷气式飞机如轰炸机、中远程运输机和歼击机等上最常采用的一种电源系统。它是通过恒速传动装置将发动机变化的转速转换为恒定的转速，使发电机发出 115/200 V、400 Hz 的三相交流电。其结构如图 0.4.2 所示。

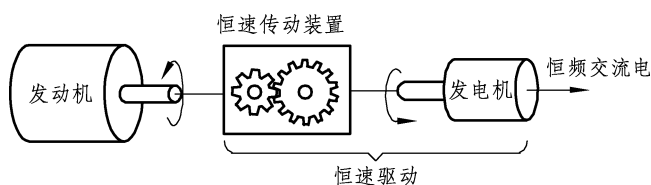


图 0.4.2 CSCF 结构示意图

CSCF 对飞机上的各类负载基本都适用。由于使用的交流电的频率是 400 Hz，比一般市电频率高，可减小用电设备中的变压器、滤波电容等电磁和电气元件的体积，电动机转速高、重量轻，能满足陀螺仪等高速电动机的要求。频率与发电机的转速有关，受电机结构、强度、损耗及寿命等因素的限制。用电设备和配电系统的重量比变频系统轻，配电也比较简单。恒速恒频交流发电机可以单台运行，也可以并联运行，而且电气性能好，供电质量相对较高。恒频交流发电机的额定容量有 20 kV·A、30 kV·A、40 kV·A、60 kV·A、90 kV·A、120 kV·A 和 150 kV·A 等数种。

目前，这种电源主要采用组合传动发电机 (Integrated Drive Generator, IDG)、微处理器式发电机控制保护组件及汇流条功率控制组件，使其具有重量轻、体积小、可靠性高等优点。此外，由于控制组件采用了模块式设计，并具有机内自检功能，使维修性得到改善。

CSCF 交流电源系统的优点：允许的工作环境温度高、过载能力强。其主要缺点：CSD 生产制造、维护困难、电能变换效率低。

3) 变速恒频交流电源 (VSCF)

电力电子技术的发展为变速恒频电源的出现奠定了基础。1972年，美国通用电气公司研制的 20 kV·A 变速恒频交流电源首次在 A-4 飞机上装机使用，此后 VSCF 电源系统有了迅速发展，成为新型飞机电源发展的方向。VSCF 电源系统通过发动机直接传动交流发电机，发出的变频交流电经变频器变换为恒频交流电。其结构如图 0.4.3 所示。

VSCF 电源系统的优点：电能质量和电能转换效率高；旋转部件少；工作可靠；结构灵活性大；能实现无刷起动发电；生产使用维修方便。其主要缺点：允许的工作环境温度较低，承受过载和短路能力较差。

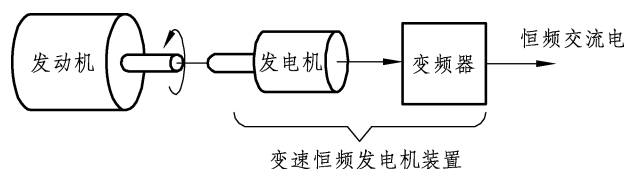


图 0.4.3 VSCF 结构示意图

3. 270 V 高压直流电源系统

随着半导体功率器件、集成电路和新型磁性材料的发展，20 世纪 70 年代开始研制额定电压为 270 V 的高压直流电源系统。270 V 高压直流电源系统采用无刷直流发电机和控制及保护装置，电网重量大大减轻，这种电源系统具有低压直流电源系统和交流电源系统的优点，重量轻、效率高，并联和配电简便，易实现不中断供电，抗干扰能力强，不需要恒速传动装置，因而经济、维护方便，但电路开关器件、电能变换装置、功率转换装置及控制相对复杂（因为高压直流电源系统高空断弧困难，所以普通带触点的开关器件均无法使用，只能采用没有触点的固态功率控制器或混合式功率控制器）。

目前，美国军用飞机，如 F-14 A 战斗机、S-3 A 和 P-3C 反潜机等局部采用了高压直流供电技术，F-22 战斗机已经采用了 270 V、65 kW 的高压直流电源系统；F-35 战斗机采用了 270 V、250 kW 的高压直流电源系统。因此，270 V 高压直流电源是未来飞机电源的发展方向之一。

不同文献对飞机电源系统的发展有不同的分类方式，按照飞机动力装置的发展情况也可划分飞机的不同发展阶段。飞机电源的发展情况，请扫描二维码查看。



飞机电源的发展



本模块主要介绍飞机电气电路中的导线、电缆、控制和保护装置。它们在配电系统中起电能传输、分配、保护与控制作用，主要由导线、电缆、断路器、熔断器、继电器和接触器等组成。在学习中，不仅要注重理解，同时加强记忆，尤其是掌握基本的理论知识。在今后学习和工作中，学会运用这些知识和方法研究具体设备的维护，以便在实践中提高维护操作技能。

任务 1 电路连接装置

知识目标

1. 掌握导线、电缆和汇流条的作用和特点。
2. 掌握导线和电缆的标记编码、规格及选用原则。
3. 掌握连接装置和电气搭接等概念。

能力目标

1. 能区分导线、电缆和汇流条等不同概念。
2. 能辨识导线和电缆的标记编码、规格及选用原则。
3. 能分析压接的优点。

思政目标

1. 养成“严谨细实”的机务作风，培养学生分析问题和解决问题的能力。
2. 树立航空安全意识，具备团队合作精神。
3. 铸匠魂、立匠德，培养工匠精神。

【情境创设】

飞机上的导线和电缆就像人体中的神经网络一样，它们在飞机上分布广且复杂，

一旦投入使用，必须防止过载，如果发生过载则会引起过热，甚至火灾等。对于一架中大型固定翼无人机，良好的布线是无人机装配过程中非常重要的一个环节，它能有效保障无人机系统的完整性、安全性及可靠性。因此，对飞机线束的研究，对加工、装配、维护及修理都极为重要。导线和电缆的安装不能认为是“安装后就不用管”，没有正确安装、使用及维护导线，对系统的可靠性会造成严重的影响。

【任务实施】

教师带领学生到停机坪参观，观察教学用飞机上电路连接装置的分布情况。请学生对导线、电缆、汇流条分布情况进行分组讨论，告诉学生导线和电缆呈现形式多样，电气导线和电缆是飞机不可分割的一部分，导线和电缆一旦安装，则必须受到保护，一旦出现过载，会导致过热、释放毒气，甚至引发火灾。因此，对于导线及其连接装置需要仔细检查和维护。

知识点 1 认识导线和电缆

导线和电缆是组成电源和输配电系统的重要装置，它连接在飞机电源和用电设备之间，以及用于不同用电设备之间的互联，用来传输电能或信号。根据不同的用电设备及技术指标分类，导线和电缆的种类很多。

1. 飞机导线

导线是电气线路最基本的元件，可以说有电气线路的地方就有导线。导线担负输送电能和传递电磁信号的重要任务，在电路中起金属电气连接的作用，是飞机电网的主要组成部分。飞机上的导线通常采用浸锡、镀镍、镀锌或者镀银的铜线作为线芯(导体)，外面包有绝缘层。也有的飞机采用铝制导线，使用铝线是为了减轻飞机重量，减少发动机的耗油量，提高经济效益，但端口接线处处理不好，容易增加接触电阻。常用导线可分为普通导线和专用导线，普通导线又可分为高温导线和普通温度导线，专用导线又可分为防火导线和热电偶连接导线，详情请扫描二维码查看。



专用导线

根据工作电压不同，导线可分为低压导线和高压导线(图 1.1.1)。电压较低电路所用的导线，绝缘层比较薄，主要是塑料，线芯由多股细铜丝绞合而成，有的用强度较大的铜合金丝绞合(后者仅用于较细的导线)。保护部分采用涂有蜡克油的棉织套或尼龙套。而在发动机高压点火电路和无线电设备的高压电路中，电压高达 10 000 V 以上，导线绝缘层比较厚，这种导线称为高压导线，早期飞机一般采用硫化橡胶，现在多采用耐高温塑料，如聚四氟乙烯等。

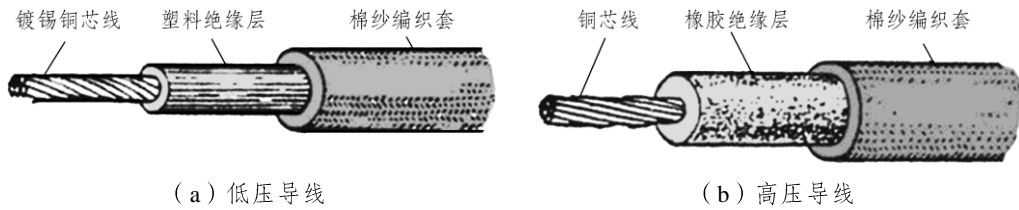


图 1.1.1 飞机导线

飞机导线的型别主要由外包的绝缘材料决定，由于导线的镀层及使用的绝缘材料不同，导线的耐用性和适用温度范围也不同。而绝缘材料大部分是有机化合物，在热、湿作用下，材料产生分解、挥发导致绝缘性能下降，耐潮湿性能变差和机械强度下降，产生热老化。因此，绝缘材料的寿命就是导线的寿命，应从寿命的角度规定材料的极限温度。一般而言，镀锌的额定工作温度为 135°C ，镀银为 200°C ，镀镍为 260°C 。在选用导线或电缆时，要考虑到其温度适用等级和绝缘等级，普通区域绝缘材料（温度小于 135°C ）一般由聚氯乙烯（PVC）、尼龙或其他塑料材料组成；高温区域（如发动机、APU 和气源管道附近）绝缘材料（温度大于 250°C ）一般为带玻璃纤维的聚四氟乙烯（PTFE）材料。

2. 飞机电缆

为了在飞机上合理布置导线，便于维护，飞机导线一般成束有规则地安装在飞机上，这种成束的导线称为电缆，如图 1.1.2 所示。

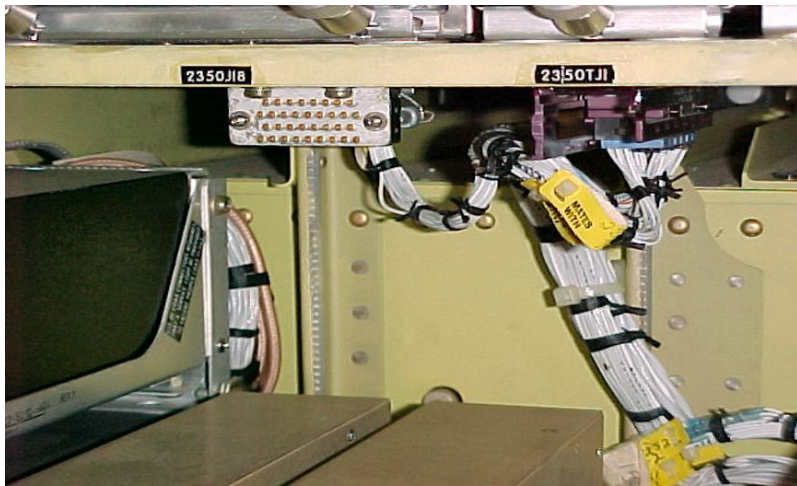


图 1.1.2 某型飞机电子系统电缆

根据无人机电气系统的不同要求，如抗电磁干扰、可靠性等，有的飞机电缆外部带有屏蔽层，有的则不带，飞机电缆如图 1.1.3 所示。

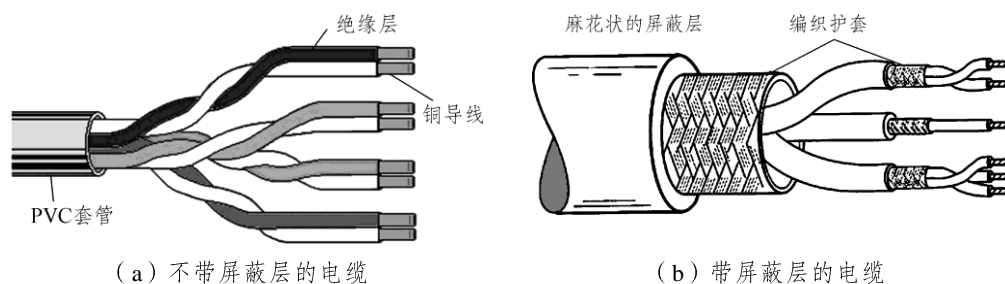


图 1.1.3 飞机电缆

电缆外部一般套有起特定作用的保护层，因而有较完善的防护能力，如具有较强的抗拉、抗压、耐蚀、防水、阻燃、屏蔽等特性。如用防波套将电缆套起来，起到电磁屏蔽的作用，以避免其对工作的无线电设备产生干扰。带屏蔽层的目的是能够防护来自大电流转换电路的辐射或者保护容易受到外界影响的电路。使用时，屏蔽层一定要良好接地，把电磁干扰信号接入大地后才有屏蔽效果。用胶带或者胶管将电缆缠起来，以防止液体、潮湿环境对其影响；用石棉条包扎起电缆，以防止电缆遭受高温而烧坏，有的电缆也采用塑料管、硬铝管、防火布等作为其外部保护层。为了防止因振动而磨损电缆，常用固定卡或固定带将电缆固定在飞机上。

技能点 1 导线标记、规格及选用原则

1. 导线标记

在飞机的所有系统中，每根导线或电缆均有标记，便于在日常维护工作中检查电路和排除航空器故障时辨认导线或电缆。在飞机上安装的每根导线都有属于它自己的走向，不同的飞机制造厂商对导线的标识方法略有不同。一般在导线端部标记起点和终点，所属系统的类型、编号及线规，有时在导线上每隔一定距离做一次标识。在复杂场合（如电缆被捆绑成束）整个线束给定一个识别码，标识在套管和套环上，如图 1.1.4 所示为一种导线标记。

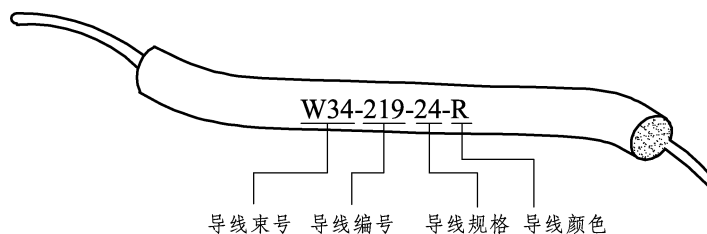


图 1.1.4 一种导线标记

按照不同的标准，标记也各不相同，这些标记是厂家用特殊的打印机打在导线和电缆上面的，打印的颜色主要取决于导线的颜色。还有的用导线表皮的颜色作为分系统的标记。例如，三相电源的 A 相导线用红色，B 相导线用黄色，C 相导线用蓝色，中线（零线）用黑色。

2. 导线规格

在美制飞机上使用的导线的规格是根据美国线规 (American Wire Gage, AWG) 定义的。它使用数字表示导线直径, 数字越大直径越小。例如, 12 号线的直径是 0.081 in (0.2057 cm), 22 号线的直径是 0.025 in (0.0635 cm)。导线最大直径是 10 AWG, 最小的直径是 40 AWG。导线标识以 6~60 in 的间隔打印在外壳上, 包括了导线产品号和制造商的商业和政府机构代码。打印颜色可以是绿色或者白色 (取决于导线颜色)。

3. 选用原则

在选用导线或电缆时, 要考虑到导线或电缆的安装环境、温度等级和绝缘等级。如果导线或电缆的环境温度是 105 °C, 用在航空器的常温区域; 如果导线或电缆的环境温度是 250 °C, 用在航空器的发动机、APU 和气源管道附近等高温区域。铝线主要用于民用航空器的电源系统的部分线路 (发动机、APU 区域不允许使用)。在民用航空器上使用的导线或电缆大多遵循波音材料规范标准 (BMS), 在一些重要系统 (如导航系统、飞行操纵系统、发动机控制系统等) 采用高于 BMS 的美国军用标准 (MIL) 导线或电缆。空客系列的飞机导线或电缆使用的是 MIL、AIR、SN2S 标准, 也有个别导线使用 BMS 标准。

例如, 按照 MIL-W-M22759 制造的导线必须符合尺寸和构造要求, 且性能指标符合绝缘层容易去除、容易焊接、电介质试验、柔性、拉伸强度、高低温试验、可燃性能、生命周期试验、液体浸泡、湿度、烟雾散发等方面的要求。在对导线进行维修更换时, 必须满足: 负载电流不会在导线上产生过大压降, 不会导致导线过热。在实际安装或更换导线时, 应考虑以下因素: 导线长度、额定电流、允许压降等。此外, 还要考虑导线的工作状况, 即导线是连续工作, 还是断续工作。对于 28 V 电源系统, 在连续工作制下的允许最大压降为 1 V, 而断续工作制下的允许最大压降为 2 V; 对于 115 V 电源系统, 在两种工作制下的允许最大压降分别为 4 V 和 8 V。

技能点 2 导线故障

导线故障是飞机常见故障, 工作环境恶劣、导线通电电流超过定额、导线绝缘耐压击穿等都是引起导线绝缘老化而产生故障的原因。

1. 导线工作的恶劣环境

空中迎风和潮湿环境下工作的导线, 不同于飞机内部工作的导线, 它们通常靠近机轮、机翼、折弯搭接处以及机外部分区域, 这些区域的环境很恶劣。用于这些环境下的导线通常与它们的结构有关, 需要专门设计, 不能随意替代。应使用飞机制造商维修手册中推荐的导线, 并根据环境工作条件选择绝缘和套管等。

2. 导线的降额使用

在选择导线进行电能传输和分配时应考虑以下几个因素：

(1) 根据应用场合不同，导线必须有足够的机械强度，导线直径太细会在受到振动、弯曲时容易断裂。

(2) 导线输送电流时产生的功率损耗为 I^2R 。由于导线输送电流时产生热量，当导线直径不能满足要求时，只有增大直径。但导线直径增大将增加成本、重量及需要更多的其他支持。因此，导线直径的选取必须考虑在各种因素下进行优化。如果导线有绝缘包裹，则散热不良。因此，为了减小绝缘材料受热，导体电流必须小于规定值。但当导线工作在温度较高的环境下，外界的热量也影响导线的工作。因此，导线的最大允许电流值也将受到环境温度的影响。

(3) 如果导线上的电压一定，则负载的突变会导致导线通流变化，使阻抗压降变化，从而使电压调节特性变差。可采取的弥补措施是增大导线直径，减小导线电阻，但会使导线的尺寸和重量增加。

(4) 导线捆扎的影响。当导线被捆扎使用时，与单根导线相比，散热变差，因此必须降额使用。

(5) 随着飞行高度的增加，捆扎在一起的导线散热困难，导线的流通容量必须降额使用。

3. 导线故障的规律

使用初期，由于厂家装配不适当的原因，容易出现导线故障。在装配问题凸显后，通过适当的调整和修理，存在较长的平稳期，导线故障率很低，甚至为零。随着机龄的增长，由于导线老化、腐蚀、磨损等原因，故障变得相对频繁。导线故障有隐蔽性和影响性的特点，严重威胁着飞行安全并易造成较大的经济损失。

4. 导线故障的预防

根据故障发生规律，可以采用主动预防的措施，发生之前就将故障隐患进行纠正。先对新飞机部件，进行仔细反复检查，尽早发现导线装配上的问题并采取正确方法进行纠正。重视一些严重导线污染（油污）和导线安装固定松动和不规范的情况，并对此及时进行清洁和纠正，降低因为污染和摩擦而对导线产生腐蚀和磨损，从而推迟导线故障发生的时间，可以有效延长导线故障稳定期时间，降低故障发生率，从而提高飞机和部件的可用性。

知识点 2 连接装置

飞机上的导线和电缆都要通过连接装置连接，才能形成完整的无人机电气系统。通常按照元件连接或断开频率，连接分为较永久性的和按照维修计划规定时间内需要拆卸的连接。



飞机导线的日常维护和故障排除

1. 较永久性的连接

较永久性的连接装置主要有压接和钎焊两种方式。压接是利用压力将导体和接头连接在一起，而钎焊连接法常用于各用电设备内部电路的连接。一般情况下，压接是飞机导线连接的最主要方式，能够提供低成本和高品质的连接，它具有以下特点：

- (1) 连接容易实现。
- (2) 连接强度大。
- (3) 保证良好的电导率和较低的压降。
- (4) 消除了钎焊焊料溢出以及短路现象。
- (5) 消除了导线和接头之间可能引起的虚焊。

2. 按照维修计划规定时间内需要拆卸的连接

为了拆装方便以及维护的需要，必须有专门的连接装置，需要拆卸的电气连接常使用接线钉、接线片、插头、插座，它们统称为连接器。其中，接线钉可以是螺钉或螺栓，用来将分配或传输电能的导线连接到电源系统，也可以将导线连接到各种控制电路的装置或飞机的壳体上。连接器中的插钉、插孔常采用可更换式，插头、插座常通过连接螺母组合，这样拆卸很方便。

电连接器是电气系统中最常用的一种连接导线和电缆的方式，它可以用来连接单根或多根导线，通常由插头和插座组成，采用插针和插孔的对接形式导电进而传输信号，而多根导线之间彼此绝缘，抗干扰能力强，且还应满足航空器件的三防要求：防水、防盐雾、防振动。常用的电连接器有圆柱型、方型、同轴型以及接线片型，如图 1.1.5 所示。

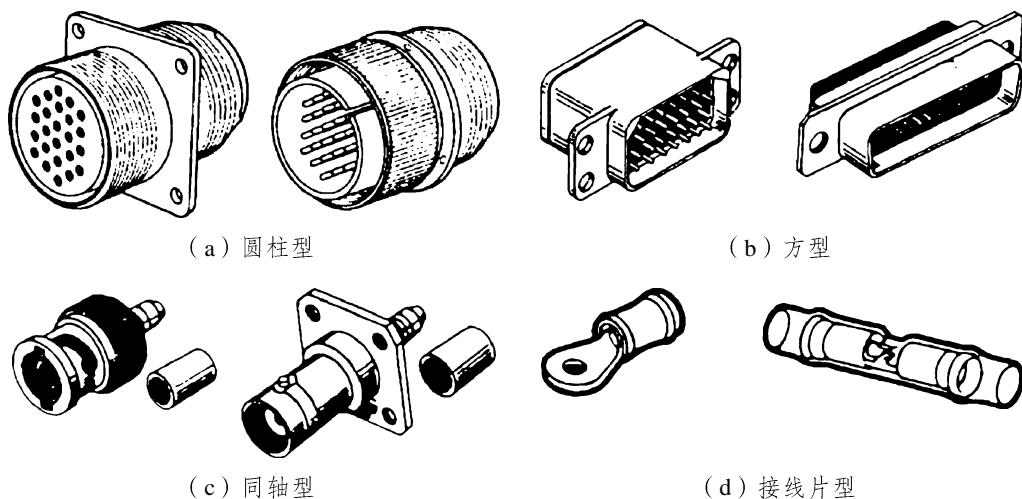


图 1.1.5 电连接器类型

3. 汇流条

飞机上用于把电能输送到各种负载的公共点称为汇流条 (BUS)。汇流条又称为接线条或配电条,实际上是一根低电阻的导体,通常是镀银的铜条或铜棒。它将发电机、蓄电池以及负载连接在一起用于电能的输入和输出。汇流条可以是直流汇流条,也可以是交流汇流条。而飞机配电系统就是以多个汇流条为基础,采用导线和电缆等将电能按照预定的路径分配到飞机的各个部位。

根据用电设备的重要程度,在飞机上,将它们分布于不同的汇流条上。图 1.1.6 所示为某型飞机上的汇流条的应用,图中有主汇流条、1号电子设备汇流条、2号电子设备汇流条、蓄电池汇流条等。

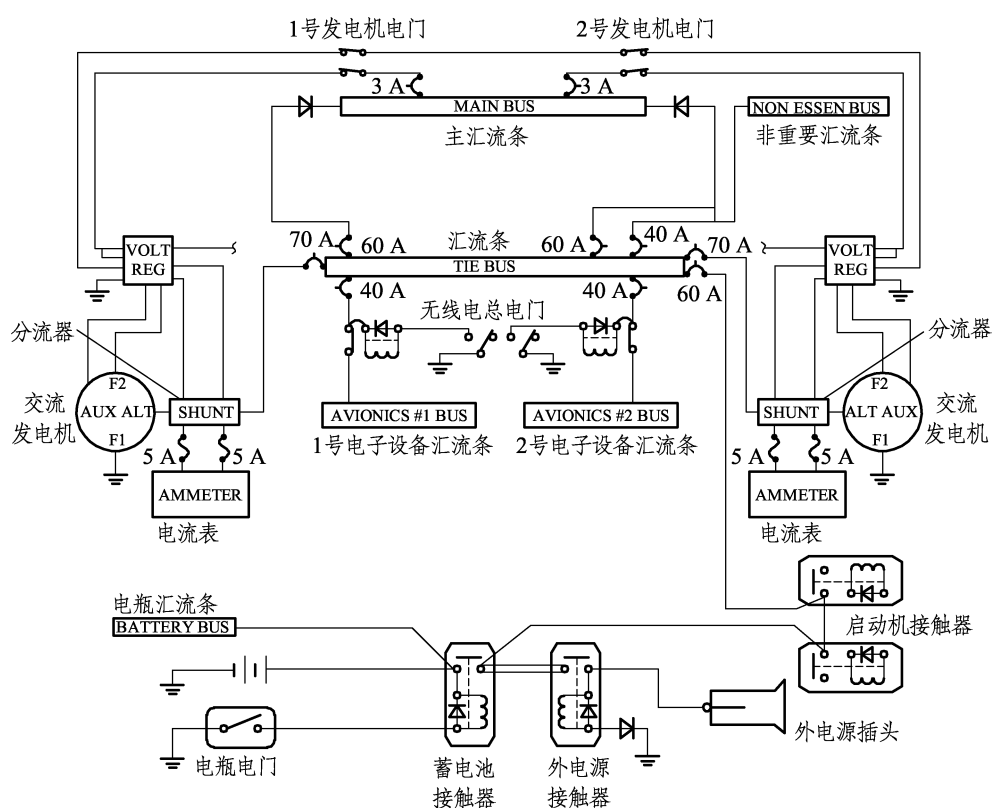


图 1.1.6 汇流条在飞机上的应用

根据汇流条的功能与作用,机上有各种级别的汇流条,主要有主汇流条、蓄电池汇流条(或称应急汇流条),以及各个分系统的供电汇流条。一般飞机上绝大部分用电设备都连接在主汇流条上,次要用电设备连接在非重要汇流条上。当飞机电源系统故障,可以首先切断非重要汇流条上用电设备的供电。

技能点 3 电气搭接

电气搭接又称“搭铁”，它是飞机各金属结构之间以及机体与飞机设备、附件之间的一种专门的低阻抗电气连接。一般使用导线、金属编织带或金属片搭接，使原来无充分电接触的飞机结构部件之间或结构部件、设备、附件与基本结构之间必要的低阻抗导电性，可以防止飞机结构部件之间或结构部件、设备、附件与基本结构之间产生电磁干扰电平，提供电源电流返回通路，也是防电击、静电防护、雷电防护以及保证天线性能最佳的必要措施。搭接的良好与否，直接影响飞机的安全和性能。搭接电阻测定是飞机质量检验的重要项目，通常搭接电阻为 $600 \sim 2\,000 \mu\Omega$ ，可以用专用的接地电阻测试仪进行测量。

1. 搭铁线的安装

(1) 将固定搭铁线的螺母用扳手固定住，用小号一字螺丝刀拆下搭铁线，检查搭铁线无断丝现象，其结合面无污垢。同时，注意检查小螺钉和垫片，以防丢失。

(2) 将搭铁线安装到原位。

(3) 注意事项：要在切断电源的情况下进行工作；各连接点处一定要清洁，要清除安装处的油垢、漆层等污物；安装时，各接线片要摆放整齐，拧紧螺钉的力量要适当；负极线装好后要用红漆漆封，做好标记。用油漆在安装螺钉、接线片和机体之间涂一窄红线。

2. 搭接的一般要求

(1) 金属零件尺寸要求。机内面积超过 0.2 m^2 或长度超过 0.5 m 的金属零件都要搭接。

(2) 不影响各项性能。设计搭接时，应注意不可影响飞机结构的完整性，不可影响飞行安全、操纵性能、空勤人员视界、气密和油密以及设备性能。

(3) 与基本结构可靠搭接。设计图纸规定的搭接点及负载（中线）接地点都必须与基本结构可靠搭接，不允许遗漏任何一处。

(4) 搭接件与垫圈选用。镀镉钢制搭接件在 $230 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下使用。镀锡钢制搭接件在 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下，用于镁合金构件搭接。镀锌搭接件除对镁合金构件搭接时可用，其他禁止使用。禁止使用齿形垫圈、阳极化垫圈、法兰平垫圈和无金属保护层垫圈，高温区使用不锈钢垫圈。

(5) 尽可能采用永久性搭接连接。凡是有可能的部位，应尽可能采用永久性的固有搭接连接，如焊接、压接等。

(6) 搭接线连接安装。搭接线的各种连接安装，均应保证其搭接性能不受飞机正常运行及维护时振动、冲击、温度变化及相应位移的影响，其安装位置应便于地面维护时检查和更换。搭接线安装时应有一定的松弛度，但不能影响各活动部件及减振器

的工作。

(7) 搭接线长度短、数量少、截面积小。在满足要求的前提下,应尽量选用长度短的搭接线,也要尽量做到数量少、截面积小,不可以将几根搭接线串联使用。

(8) 零件搭接。零件搭接一般不应采用间接搭接的方式,而应直接搭接到基本结构上。

(9) 不同电源种类电路、易受干扰设备和电路搭接点单独安装。不同电源种类电路的搭接线不能装在同一搭接螺栓上。易受干扰的设备和电路的搭接点应单独安装。

(10) 金属编织搭接线安装。安装金属编织搭接线时,金属丝不应有折断。但在难于施工的部位,对已安装好的搭接线在 200 m 长度内允许有不超过 4 根断丝。

(11) 线束屏蔽套接地。线束屏蔽套接地可通过电连接器的插针插孔,也可直接连接到基本结构或通过电连接器外壳接地。

(12) 管路搭接线安装。应采用非减振夹紧装置及其与搭接线的组合件,不可使用减振卡箍。当需要在可弯曲的金属导管或软管上安装搭接卡箍时,应保证圆管不弯皱或损坏。

(13) 防止搭接或隔离不良。应特别注意防止因搭接或隔离不良而造成导电断续的电接触。这种接触在可能成为地平面或电流回路时产生火花或射频干扰电平。

【学习体会】

通过本任务的学习,你都学到了什么?请写在下面。

【任务测评】

请学生根据所学知识,完成以下任务:

1. 飞机上的导线根据电压的不同分为?
2. 导线压接是通过压力使接头与导体结合在一起的,在飞机上使用较多,它具有哪些优点?
3. 什么是电气搭接?

【课程思政】

机务战线的模范标兵——夏北浩

夏北浩，1938年出生于广东新会。旧社会的童年生活带给他无尽的苦难，他的奶奶、父亲和两个姐姐先后被饿死，哥哥为逃“壮丁”不得不远走他乡，年幼的夏北浩跟着母亲下地耕田谋生。1949年，随着家乡解放，夏北浩家里也终于分了田地，一家人终于不再为生计发愁。正是这段经历，让夏北浩对党、对新中国充满了感情，立志为党和人民做点事。

1957年，经过多次报名，夏北浩终于如愿以偿参军入伍，分配到空军航空学校学习机务。从只有初中文化、普通话都听不懂的少年，成长为门门功课5分的优秀毕业学员。1959年，夏北浩被分配到空军原航空兵某师任机械员。当战士期间，他先后荣立三等功3次，二等功1次。

1962年，夏北浩任职机械师。在担任机械师期间，夏北浩针对当时飞行事故频发的情况，认真学习《飞机统一检查条例》。当时，部队有一架飞机经常发生故障，夏北浩主动申请当这架飞机的机械师，按照规程严格对飞机进行检查，最终使这架飞机成了样板机，并在此基础上总结出一套自己的检查维护方法。

1963年，夏北浩所在师组织机组办学，从全师抽调机务尖子一起学习研究。夏北浩抓住机会向战友们请教学习，不断完善自己的检查方法。1964年，汇集群众智慧的“夏北浩检查法”正式诞生，并先后在原沈阳军区空军和全空军推广，极大提升了航空机务维护质量。夏北浩的“三负责”精神，成了机务战线的一面旗帜。

1964年，夏北浩被空军党委授予“机械师尖兵”荣誉称号，先后当选为中国共产党第九次、第十次全国代表大会代表。

多年来，一代代航空机务人始终学习“夏北浩检查法”，传承夏北浩精神。2003年，在夏北浩精神发源地，北部战区空军航空兵某旅机务三中队官兵在“夏北浩检查法”的基础上总结出“新夏北浩检查法”，再次在全空军推开。第十三届全国人大代表“夏北浩模范机务中队”机械师高东垒说：“现在装备越来越先进，但是夏北浩精神历久弥新，越先进的装备，越需要我们大力传承好夏北浩精神，当好夏北浩传人，确保装备万无一失。”

引自：<https://www.xuexi.cn/lgpage/detail/index.html?id=1063329213444914966>

任务2 电路控制装置

知识目标

1. 掌握飞机电路控制装置的类型。
2. 掌握手动开关、机械开关及电磁控制装置的结构和工作原理。
3. 掌握各种开关的工作特点和维护使用注意事项。

能力目标

1. 能区分开关、接触器和继电器等不同的概念。
2. 能分析手动开关、机械开关及电磁控制装置的工作过程。
3. 能规范使用工具，对电路控制装置进行拆装分解和连接。

思政目标

1. 养成“严谨细实”的机务作风，培养学生分析问题和解决问题的能力。
2. 培养团队协作意识，强化职业素养。
3. 铸匠魂、立匠德，培养工匠精神。

【情境创设】

对于一架中大型固定翼无人机，飞机上有许多系统需要用到电路控制装置。其作用是接通、断开或转换电路。它的基本组成部分为活动触点和固定触点，通过触点的断开与闭合，实现电路中电流通断的控制。电路控制装置又称为开关电器，按照活动触点的触发方式，可以分为手动开关、机械开关及电磁控制装置三大类，其中电磁控制装置又分为接触器和继电器两种类型。现有一个接触器发生了故障，运用大家所学知识，让我们一起来把它修好吧。

【任务实施】

教师带领学生到停机坪进行参观，观察飞机上电路控制装置的分布情况。教师请学生对开关、接触器、继电器分布情况进行分组讨论，告诉学生航空继电器和航空接触器呈现形式多样，电气开关、航空继电器和航空接触器是飞机不可分割的一部分，其使用环境复杂、形式多变、超寿命使用情况突出，一旦失去控制、会造成航空器电源等重要系统故障。因此，对于电路控制装置需要仔细进行安装、检查和维护。

知识点 1 手动开关

手动开关是通过人工操作实现电路通断及转换的开关,一般应用在电流较小(35 A 以下)的电路中。简单的开关包括两种触点,即固定触点和活动触点(又称为极)。通过活动触点的运动,固定触点和活动触点可以彼此分开或闭合,实现对多个电路进行控制,触点的通断通过操作极来控制,固定触点数称为投,如图 1.2.1 所示。常见的手动开关主要有扳动开关、按钮开关、旋钮开关等。

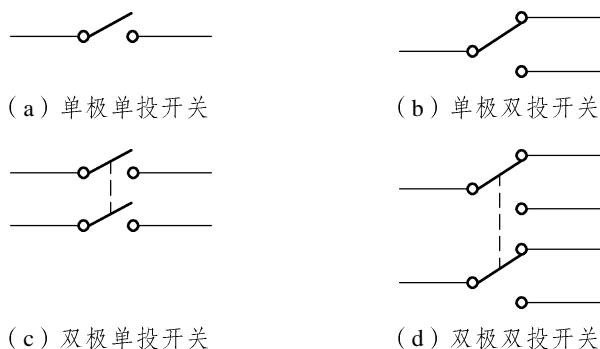


图 1.2.1 开关的分类

1. 扳动开关

扳动开关是直接由操作人员通过手动扳动开关手柄来实现电路接通、断开及电路转换的电路控制装置,具有一定的断流容量及承载能力。常用的扳动开关有拨动开关、联动开关、限动开关和保护开关等。

1) 拨动开关

由于构造的不同,拨动开关实现的电路通断功能也各不相同。有的拨动开关只能实现一个电路的接通和断开,有的可以在断开一个电路的同时接通另一个电路,有的则能实现多路转换。飞机上的拨动开关有两位开关和三位开关两种。如图 1.2.2 所示,这是一个典型的三位开关,用来控制备用罗盘灯的开关和亮度。当开关在“OFF”位时,备用罗盘灯熄灭;当开关在“DIM”位时,备用罗盘灯暗亮;当开关在“ON”位时,备用罗盘灯明亮。

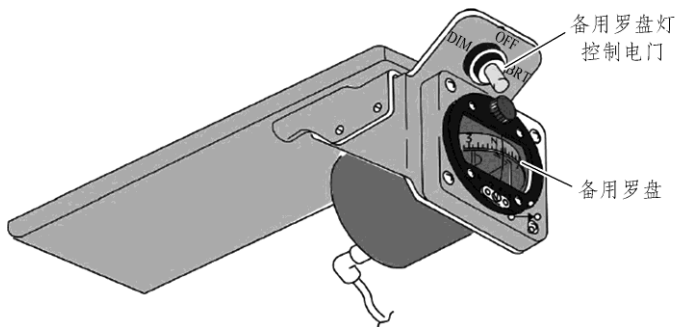


图 1.2.2 典型的三位开关

2) 联动开关

联动开关能够实现多个电路的联合控制，常见的联动开关如图 1.2.3 所示。

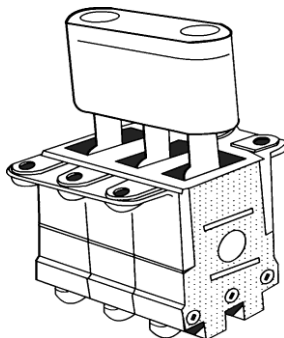


图 1.2.3 联动开关

3) 限动开关

限动开关为限定动作的开关，能够防止误操作，对电路的开合起限定和保护作用。如图 1.2.4 所示的限动开关，开关 1、开关 2 和开关 3 在同一时刻只能有一个闭合。

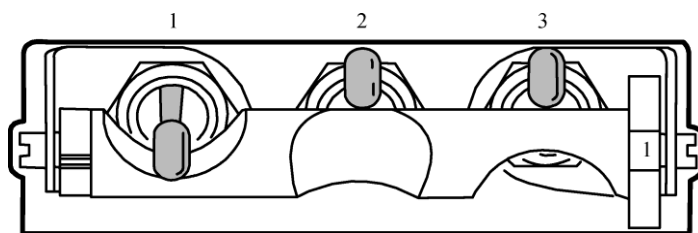


图 1.2.4 限动开关

4) 保护开关

保护开关在开关外部设有保护套，对开关能起到一定的保护作用，防止误操作，如图 1.2.5 所示。

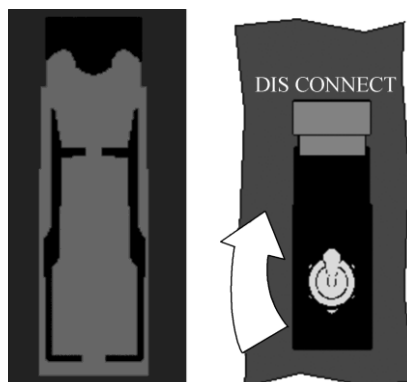


图 1.2.5 保护开关

2. 按钮开关

按钮开关是以按钮为传动装置的开关，多用于短时工作。它主要是由按钮帽、复

位弹簧、常闭触点和常开触点等元件组成，如图 1.2.6 所示。其中，常开触点代表该按钮在常态下处于断开状态，常闭触点代表该按钮在常态下处于接通状态。操控人员通过按钮帽改变常开触点和常闭触点的位置来实现对系统的控制。有的按钮开关还具有告警和指示功能，在按钮顶端设置灯泡，外部罩有适当颜色的半透明塑料罩。

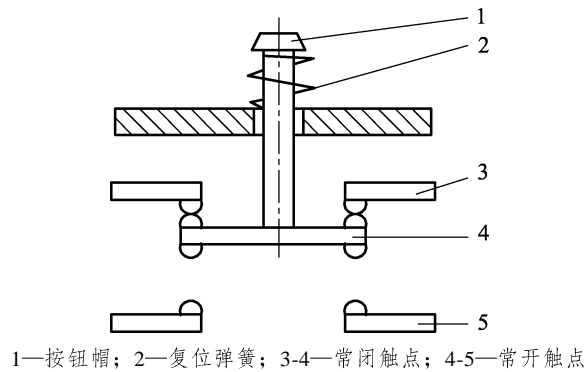


图 1.2.6 典型的按钮开关

按钮开关的工作方式大致有三种：按下工作，松开复位；按下自锁，再按下复位；按下一次，电路转换一次。由于工作方式不同，按钮开关的结构也不相同，有单级、双级、多级等多种形式，外形也有圆形、方形、多边形等，并涂有不同的颜色，如图 1.2.7 所示。



图 1.2.7 按钮开关

3. 旋钮开关

旋钮开关又称为选择开关，多用于多电路的选择。旋钮开关绝大多数为电位计型旋转开关，它主要由旋钮、接线片、滑针和电阻丝等组成。通过旋钮位置的改变，滑针和电阻丝的相对位置发生改变，接入电路的电阻值也发生改变，如图 1.2.8 所示。通过接入电阻值的变化，旋转开关给控制系统发出不同的控制信号。在飞机上典型的应用就是用单个电压表读出多个汇流条电压。另外，在某些情况下，将旋钮开关和变阻器组合在一起，用来通断电路并调节电流值，通常用于仪表板照明或音量控制。

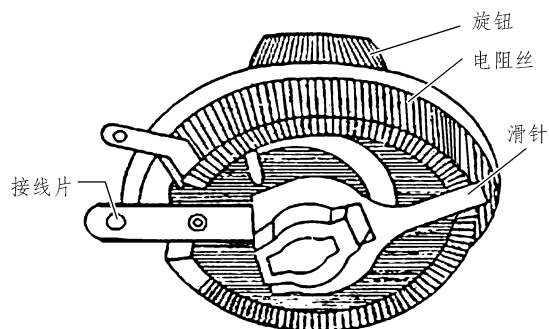


图 1.2.8 旋钮开关

知识点 2 机械开关

机械开关是靠机械外力来实现电路通断的飞机电路控制装置。机械开关通常用在由机械力自动控制触点接通和断开的电路中。机械开关的种类很多，下面主要介绍两种：微动开关和接近开关。

1. 微动开关

微动开关又称为微动电门、灵敏开关或速动开关。所谓微动，指的是开关触点接通和闭合的行程很短，常用于感测一个器件是否达到极限行程（如襟翼驱动机构及起落架机构等）或需要频繁通断的小电流电路中。图 1.2.9 所示为一种常见的微动开关。

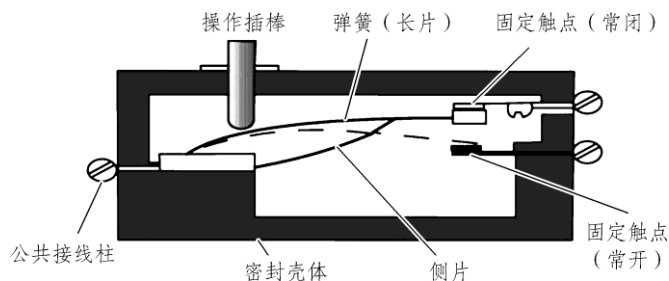


图 1.2.9 微动开关

微动开关的特点：动作迅速、工作可靠、精度高、寿命长、体积小，是一种特殊的开关，常用于需要频繁通断的小电流电路中。一组微动开关与一定的机械装置相连，可以构成定时开关。定时开关主要用于控制用电设备在预定时间内按照一定顺序可控地工作。图 1.2.10 所示是一种定时开关的结构。

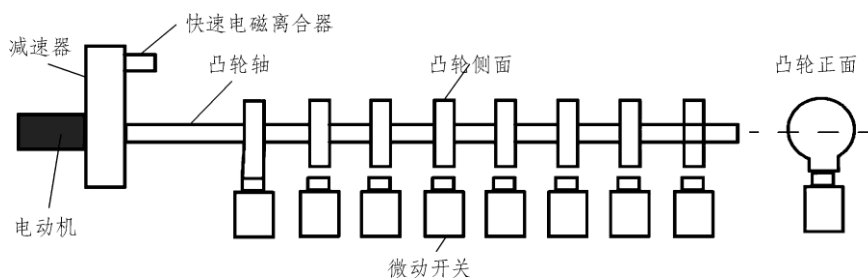


图 1.2.10 定时开关

2. 接近开关

接近开关没有固定触点和活动触点，因此又称为无触点行程开关。它监测物体与其接近到一定距离时，不需要接触，就能发出动作信号，实现电路的通断。由于接近开关没有触点，因此，安装方便、反应迅速、定位准确、寿命长，并且没有机械碰触。缺点是触点容量较小，输出短路时易烧毁。目前广泛应用于行程控制、定位控制、自动计数及各种安全保护等方面，如飞机舱门的安全关闭检测等电路。

接近开关是利用传感器与被测物体之间的相互能量变化来获取信号的，根据传感器的不同，接近开关可以分为电磁感应式、光电式、电容式、霍尔式、红外式等多种类型。图 1.2.11 所示为接近开关在飞机上的应用原理图。

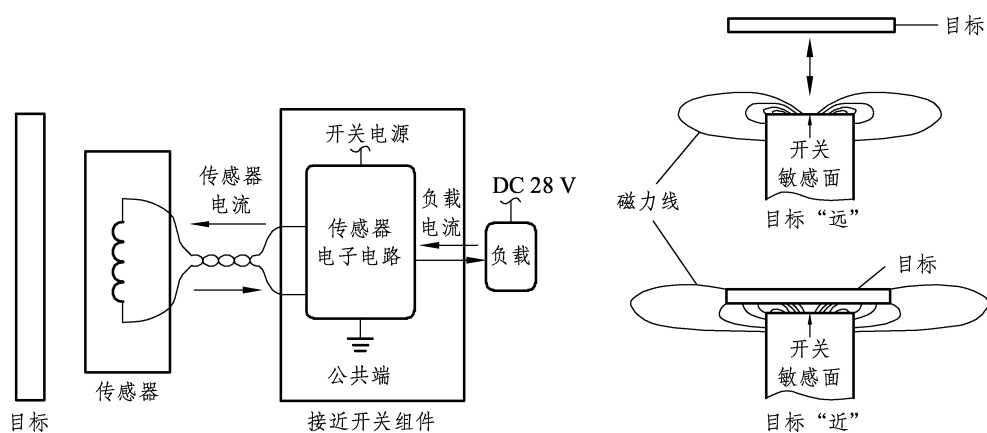


图 1.2.11 接近开关在飞机上的应用

知识点 3 航空接触器

电磁控制装置是利用电磁铁来操纵活动触点，以控制电路的接通、断开或转换，电磁控制装置通常分为接触器和继电器两大类。

接触器是一种用于远距离控制交流、直流主电路或大容量电路通断的大容量控制开关。例如，用于飞机上主电源系统的发电机向主汇流条供电的连接开关，或发电机的励磁线圈的控制开关。

接触器的种类很多，按照其接触点所控制电路性质的不同，可分为直流和交流两种；按照触点的类型不同，可有单极单投、单极双投、双极双投、三极单投、三极双投等；按照接触器本身的结构原理则可分为单绕组、双绕组、磁闭锁型以及机械闭锁式接触器等。

1. 单绕组接触器

单绕组接触器在现代飞机上常用于只需短时工作，触点可承担较大负载的控制电路（工作电流大于 25 A），如用于操纵飞机舵面或调整片的电动机等。图 1.2.12 所示为单绕组接触器原理图。

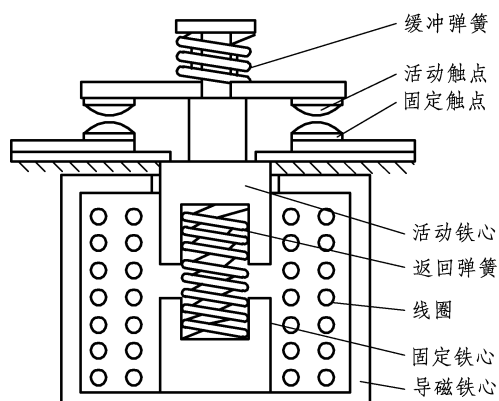


图 1.2.12 单绕组接触器原理图

单绕组接触器只有个工作线圈，其结构由电磁系统和触点系统两部分组成。电磁系统包括固定铁心、活动铁心（衔铁）、导磁壳体、线圈、返回弹簧等；触点系统主要由活动触点、固定触点、缓冲弹簧、拉杆等组成。触点系统属于单极单投桥式双断点常开结构。

当线圈没有通电时，电磁铁的电磁吸力等于零，活动铁心在返回弹簧力的作用下，带动活动触点和固定触点分离。线圈通电后，电磁铁所产生的电磁吸力大于返回弹簧的初反力时，活动铁心向固定铁心运动，由拉杆带动活动触点与固定触点接触。线圈断电或线圈电压小于或等于释放电压时，则电磁吸力小于返回弹簧及缓冲弹簧的终反力，在返回弹簧的作用下，衔铁带动活动触点断开电路。图 1.2.13 所示为单绕组接触器的吸力-反力特性。

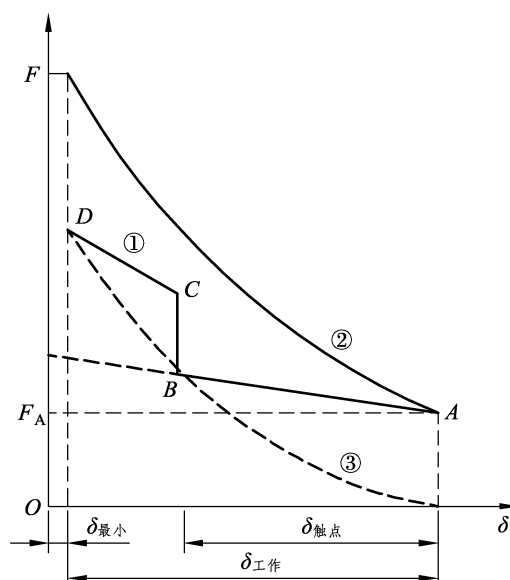


图 1.2.13 单绕组接触器的吸力-反力特性

曲线①是总的反力特性（即 $ABCD$ 折线），在 AB 段，只有返回弹簧压缩； BC 段

是触点刚闭合，缓冲弹簧起作用，故特性由 B 点跃至 C 点； CD 段是缓冲弹簧和返回弹簧共同起作用。曲线②是吸力特性，其吸力是随气隙的减小而迅速增大，呈非线性。曲线③是接触器释放过程的吸力特性。由图中曲线可知，要使铁心顺利吸合，必须使吸力特性处处高于反力特性，即 $F_{吸} > F_{反}$ ；要使接触器顺利释放，必须使吸力特性处处低于反力特性，即 $F_{吸} < F_{反}$ 。

2. 双绕组接触器

从对单绕组接触器的分析和它的吸力-反力特性可知，当铁心吸合后电磁吸力远远大于弹簧反力。实际上，铁心保持在吸合位置所需要的线圈磁势（对应线圈电压）并不需要那么大。线圈磁势大，必然使线圈和整个电磁铁的尺寸和重量增大，这是不利的，双绕组接触器则能克服这个缺点。

双绕组接触器的结构与单绕组接触器基本相同，其主要不同点是双绕组接触器采用两个绕组：吸合绕组和保持绕组，分别起吸合和保持的作用。根据连接方式的不同，双绕组接触器又分为串联型双绕组接触器和并联型双绕组接触器。

1) 串联型双绕组接触器

如图 1.2.14 所示，它有两组绕组，一组为吸合绕组，一组为保持绕组。吸合绕组：导线较粗、匝数少、电阻较小。保持绕组：导线较细、匝数多、电阻较大。

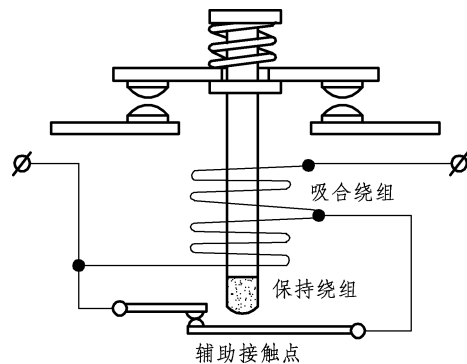


图 1.2.14 串联型双绕组接触器

线圈通电后，保持绕组被一对安装于壳体底部的辅助常闭触点短接，此时只有吸合绕组工作。在铁心吸合过程中，铁心运动到距台座 $0.6 \sim 0.7 \text{ mm}$ 时，拉杆下端的绝缘头便将辅助触点断开，使保持绕组与吸合绕组串联，共同产生电磁吸力，使接触器保持吸合。虽然吸合绕组通入较大的电流，但作用时间短，而且吸合后两个绕组保持工作的电流较小，所以线圈温升可以降低，电磁铁的体积和重量大大减小。另外，它还具有吸合触动时间较小的特点。

2) 并联型双绕组接触器

并联型双绕组接触器电磁线圈由吸合绕组和保持绕组两个绕组并联连接。

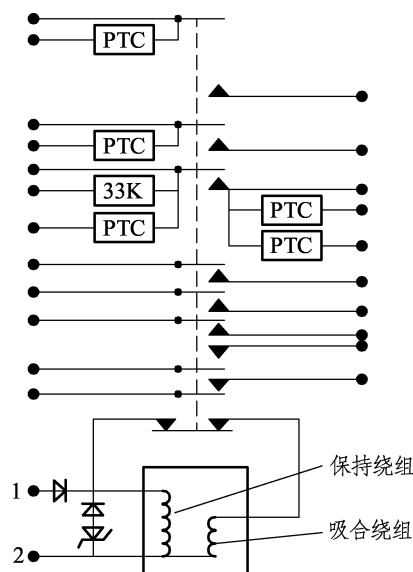


图 1.2.15 P/N BP-494 并联双绕组接触器原理图

如图 1.2.15 所示，在接触器未吸合之前，吸合绕组由一对辅助触点并入电路中。当线圈通电时，吸合绕组和保持绕组都通电，共同产生电磁吸力使活动铁心运动，带动触点闭合。在接触器闭合之后，辅助触点断开，使吸合绕组断电，此时只有保持绕组产生电磁吸力维持接触器闭合。

并联型接触器虽然吸合启动时间没有串联型的短，但由于吸合全过程两绕组同时起作用，所以可靠性较高，在飞机上被广泛应用。

3. 磁闭锁式接触器

缩小接触器的体积和重量，是一切飞机电气设备的要求。虽然双绕组接触器的绕组发热问题有所改善，但并没有完全解决。对于机械自锁型接触器，由于锁定机构采用机械装置，可靠性不高。磁闭锁式接触器克服了双绕组及机械自锁型接触器的缺点，其锁定机构采用永久磁铁锁定，使触点在闭合状态，绕组可断电，不仅能保证触点在闭合状态有足够压力，而且绕组发热问题也被彻底解决。

磁闭锁式接触器具有两组绕组：吸合绕组和跳开绕组。当绕组都不通电时，永久磁铁的磁通只有部分通过铁心，不产生吸力，铁心不动作。吸合绕组通电后，绕组磁通将产生足够大的电磁力，使铁心克服弹簧弹力向下运动，主电路的 3 对触点将吸合，同时辅助触点使跳开绕组处于预备状态。主电路吸合以后，永久磁铁将会在铁心通过较大磁通，产生大于弹簧弹力的吸力，这时不论吸合线圈是否通电，接触器都将保持在吸合位置。

当跳开绕组通电后，铁心内将产生与永久磁铁相反的磁通，产生的电磁力与弹簧弹力共同作用使接触器触点迅速断开，同时吸合线圈处于预备状态，为下一次工作做好准备。其工作原理如图 1.2.16 所示。

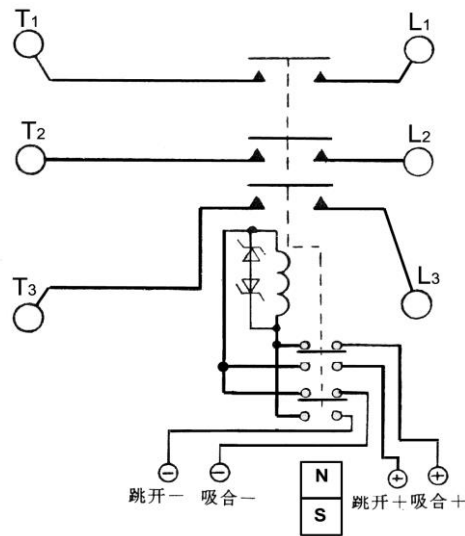


图 1.2.16 磁闭锁式接触器

4. 机械闭锁式接触器

机械闭锁式（又称机械自锁）接触器是以机械方法使主触点在电磁线圈断电后仍能自行保持其工作位置的接触器。这种接触器的结构比较复杂，如图 1.2.17 所示。

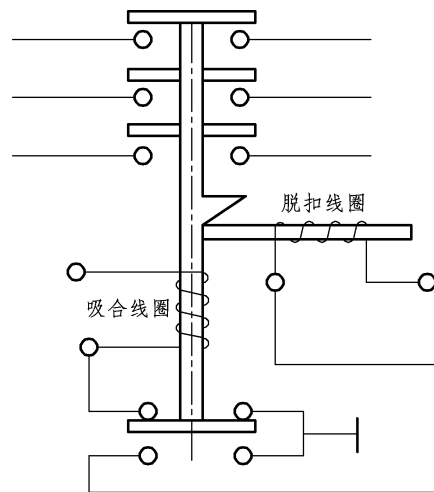


图 1.2.17 机械闭锁式接触器

它有两个电磁铁：吸合电磁铁和脱扣电磁铁。吸合电磁铁的工作线圈称为吸合线圈，脱扣电磁铁的工作线圈称为脱扣线圈。吸合线圈通电后，吸合电磁铁的活动铁心被吸下并被脱扣电磁铁的活动铁心锁住。此时，3对主触点接通被控制的电路，活动铁心下端的辅助触点转换，吸合线圈电路断开；脱扣线圈电路接通，为脱扣线圈通电做准备。当需要接触器断开被控制的电路时，只需要给脱扣线圈通电即可。脱扣线圈通电后，机械闭锁机构脱钩，活动铁心在返回弹簧的作用下恢复原位，主触点跳开。

由于机械闭锁式接触器具有可靠性高、长时间工作不消耗电能等优点，在飞机上得到了广泛使用。

知识点 4 航空继电器

继电器 (relay) 是一种非人工直接操纵能实现自动和远距离工作的开关器件，很早以前就在飞机上得到了应用。

如图 1.2.18 所示，继电器在飞机上的用途十分广泛，如电源系统，起落架系统，照明系统，燃油系统，飞行操纵系统以及发动机的工作控制和指示等系统。它们用于控制、调节、检测、保护和指示等。例如，B757-200 飞机上单独使用的继电器就有 390 多只，如果把机载设备中使用的继电器、接触器都计算在内，总数超过 1 000 只。与接触器相比，继电器的触点所控制的电路功率小 (工作电流小于 25 A)，能够在自动与遥控装置中实现电路的断开与闭合，继电器对实现飞行控制的综合自动化起着重要作用。继电器具有灵敏度高、动作迅速、体积小、重量轻、寿命长，不易受电磁干扰等优点。

航空用继电器的种类很多，下面主要介绍电磁继电器、极化继电器、舌簧管继电器、热敏继电器、固态继电器和混合继电器。



航空接触器的
定期检查与维护

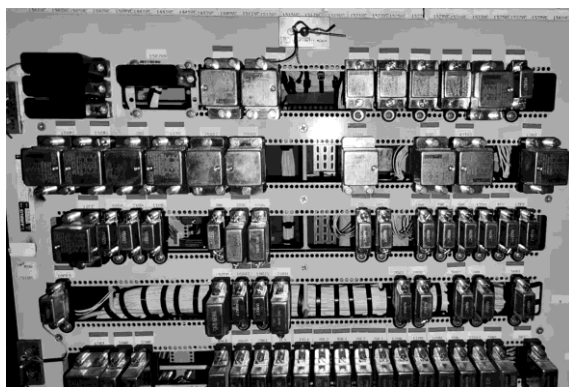


图 1.2.18 某型飞机前电子舱的继电器

1. 电磁继电器

当线圈通电时，由于磁通的作用产生吸力，吸动衔铁，带动触点，使被控制电路接通、断开或转换的继电器就叫电磁继电器。

电磁继电器一般由固定铁心、线圈、衔铁、触点簧片等组成，如图 1.2.19 所示。线圈通电后，当达到其动作电压值时，电磁吸力大于弹簧弹力，衔铁就会在电磁力吸引的作用下克服返回弹簧的拉力而吸向铁心，从而带动衔铁的活动触点与常开触点闭合，使主电路接通。当线圈断电后，电磁铁的吸力消失，衔铁在返回弹簧作用下返回原来位置，使活动触点与常开触点断开，主电路断开。通过电磁铁的吸合和断开就实现了主电路通断的目的。继电器的“常闭”“常开”触点可以这样来区分：继电器线圈

未通电时处于断开状态的触点，称为“常开触点”，处于接通状态的触点称为“常闭触点”。

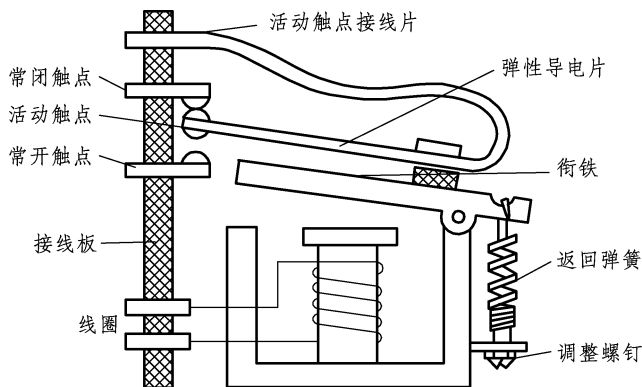


图 1.2.19 摇臂式电磁继电器原理图

飞机上所用的基本上是直流电磁继电器，即控制电流为直流电。一般都采用拍合式电磁系统（通常称为摇臂式电磁继电器）。电磁继电器的主要技术参数：

- （1）额定线圈电源电压——长时间正常工作的电压。
- （2）吸合电压 U_{xh} ——触点从释放到工作状态时，所需的最小电压值。若吸合电压太高，向大负载供电时，会使继电器无法吸合。若吸合电压太低，返回弹簧反力太小，触点易跳动。温度对吸合电压影响较大，当温度上升时，线圈电阻增大，吸合电压也升高。
- （3）释放电压 U_{sf} ——从吸合到释放所需的线圈电压的最大值，即使触点断开时的最高电压值。
- （4）触点断流容量——断开前通过触点的 I 和断开后触点两端的 U 的乘积代表触点的断流能力。
- （5）动作时间——从继电器工作线圈开始通电的瞬间至衔铁带动触点完成工作所需的时间。
- （6）寿命——规定的动作次数，即触点保持正常转换电路的能力。
- （7）灵敏度——越高越好。

2. 极化继电器

一般的电磁继电器是没有极性的，它不能反映输入信号的方向。而极化继电器却具有两个显著的特点：一是能反映输入信号的极性，二是具有很高的灵敏度，即其所需动作电流或电压值很小。

极化继电器的磁路里同时作用着两个磁通，一是永久磁铁产生的极化磁通，二是电磁铁工作线圈产生的工作磁通。工作磁通的大小和方向取决于输入信号的大小和方向。图 1.2.20 所示为极化继电器的原理图。磁路里有由永久磁



航空继电器的
定期检查与维护

铁产生的极化磁通 Φ_m ，还有输入信号通过工作线圈产生的工作磁通 Φ_g 。极化磁通经过衔铁从气隙的左、右两边分成 Φ_{m1} 和 Φ_{m2} 两部分进入铁心，然后回到永久磁铁的另一极而构成回路。

极化继电器还有“记忆”的功能，也就是当衔铁的工作状态改变之后，不论信号是否还存在，工作状态保持不变，要使它改变工作状态，必须在下次通电时改变信号的方向，即它将前一次信号的极性“记忆”住了。这种特性在自动控制系统中具有重要意义。

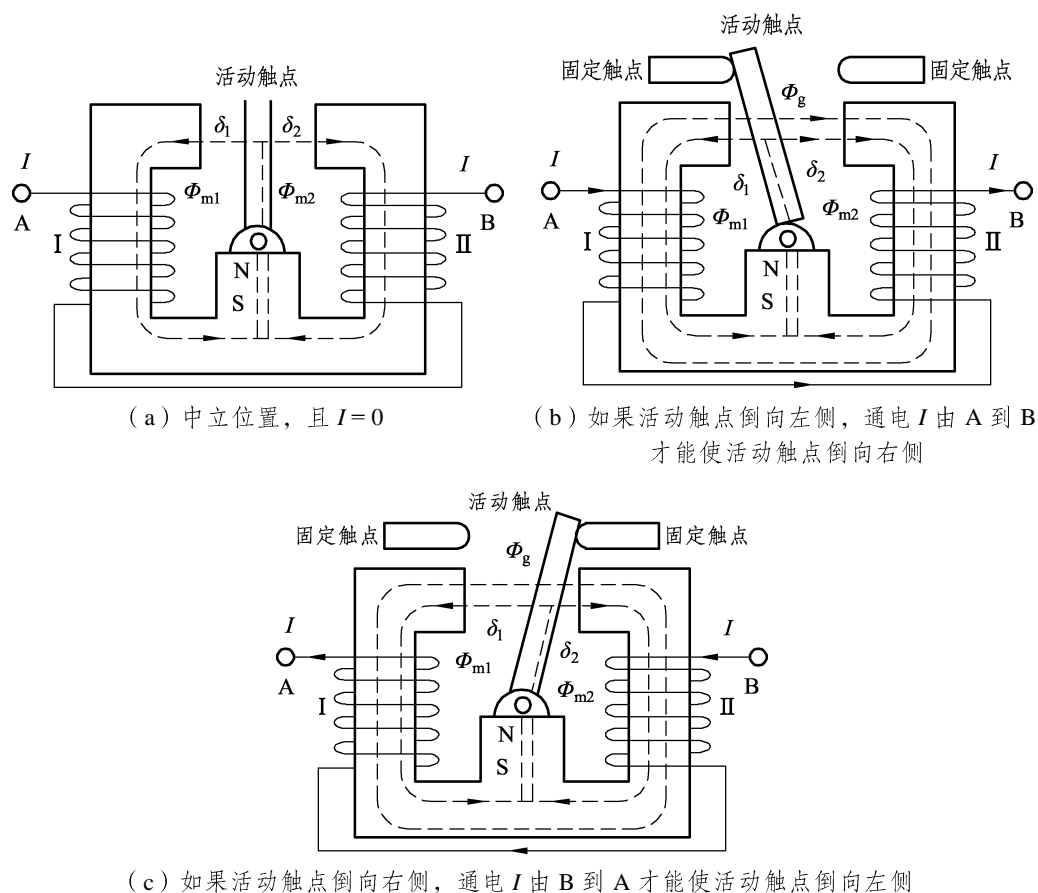


图 1.2.20 极化继电器原理图

3. 舌簧继电器

舌簧继电器主要由舌簧管及线圈等部分组成，它的结构如图 1.2.21 所示。舌簧管是舌簧继电器的主要部分，舌簧片由导磁性良好的坡莫合金制成，舌簧片本身具有一定的弹性，起恢复弹簧的作用。充有惰性气体的密封玻璃管，可以有效防止污染与腐蚀，增加触点工作的可靠性，触点可动部分质量小，吸合与释放动作很快，灵敏度高，吸合功率小，易于半导体器件驱动。但是，它的接点容易出现冷焊与粘连现象；触点距离小，转换容量小，耐压能力低；簧片为悬臂梁，断开瞬间易出现颤抖现象。

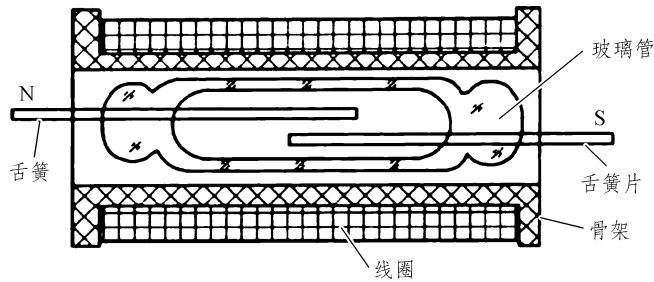


图 1.2.21 舌簧继电器结构

在舌簧继电器中干式舌簧继电器（又称干簧继电器）应用最多，它的核心部分是干式舌簧管（又称干簧管）。常开的舌簧片是分别固定在玻璃管两端的，它们在电磁线圈或者永久磁铁磁场作用下，其自由端所产生的磁场极性正好相反，靠磁性的“异性相吸”而使触点闭合。干簧管触点的通断不仅可以用线圈的通电、断电控制，也可以用永久磁铁进行控制，如图 1.2.22 所示。

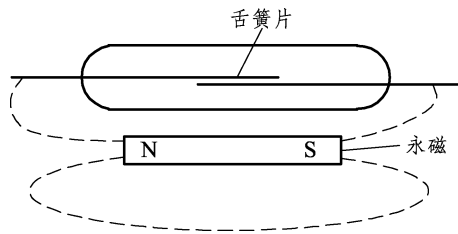


图 1.2.22 永磁型干簧继电器

如图 1.2.23 所示，常闭的舌簧片则固定在玻璃管的同一端，A、B 舌簧片在电磁线圈或永久磁铁作用下，自由端产生相同极性的磁性，靠“同性相斥”而使触点断开。在常闭舌簧片的基础上在玻璃管的另一端增加一个常开舌簧片 C 就构成了转换式触点的舌簧管。

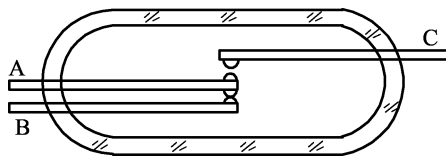


图 1.2.23 转换式触点的舌簧管

4. 热敏继电器

热敏继电器即温度继电器，感受温度的变化而控制电路的通断，它可以由热敏电阻与半导体元件构成晶体管电路，这里简要介绍双金属片热敏继电器。

因为不同材料的热膨胀系数不同，把不同膨胀系数的两种金属焊合在一起，就构成了感受温度的双金属片，利用它将温度的变化转换为双金属片的位移，如图 1.2.24 所示。双金属片上层用膨胀系数小的钢材制成，下层用膨胀系数大的铜合金制成。假定在常温下双金属片热敏继电器触点是闭合的，当感受到较高温度时，将使双金属片

自由端向上弯曲，由触点 K 将电路断开，当温度降低后，触点自动闭合。双金属片热敏继电器常用作加温元件的控制器或高温信号敏感器件。

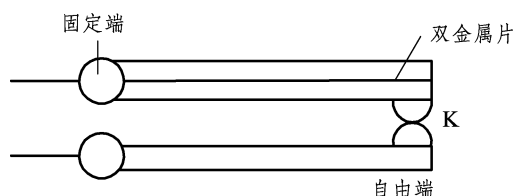


图 1.2.24 双金属片热敏继电器

5. 固态继电器

固态继电器（Solid State Relay, SSR）是用半导体器件代替传统机械触点作为切换装置的具有继电器特性的无触点开关器件，能够实现强弱电之间的隔离。早期的固态继电器多用分立元件制成，随着电子技术的发展，如今已广泛使用集成化的固态继电器。

固态继电器除了与电磁继电器具有相同的功能外，由于没有活动触点，它的寿命更长。其优点还有体积小、灵敏度高、耐振动、工作时无噪声，并且能方便地与 TTL、COMS 等集成电路兼容等。固态继电器的种类很多，下面简要介绍一种光电耦合固态继电器的工作原理。

如图 1.2.25 所示，光电耦合固态继电器是一种四端口器件。两个端口为输入端，中间为光电隔离环节，另外两个端口为输出端。信号输入后，经触发电路使发光二极管发光，发光二极管发光后触发光敏三极管，使光敏三极管导通，控制固态转换器件（大功率三极管、场效应管等）产生开关信号，实现主电路的控制。

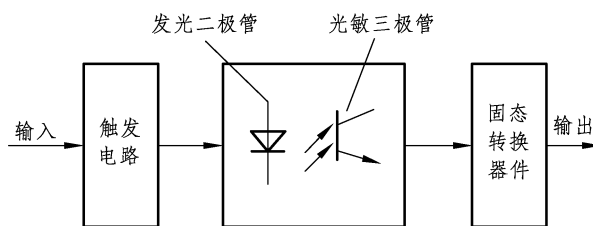


图 1.2.25 光电耦合固态继电器原理框图

固态继电器也有一些缺点，如导通后的管压降大，不能实现良好的电气隔离，易受温度和辐射的影响，抗过载能力差等。由于管压降大，导通后的功耗和发热量也较大，同功率固态继电器的体积远远大于同容量的电磁继电器，成本也较高。

6. 混合继电器

电磁继电器所需的驱动信号大，无法用集成电路的电平控制，必须增加放大环节；而固态继电器由于存在饱和压降，在大电流电路中功耗大。二者各有所长，结合两者的优点就构成了混合继电器，如图 1.2.26 所示。它以固态器件作为反应机构，可以充

分发挥固态电路灵敏度高、能反应非常微弱信号的特点，起延时、放大、整流等作用；以电磁继电器作为执行机构，充分发挥电磁继电器接触电阻低、过载能力强、容易实现多组转换等特点。

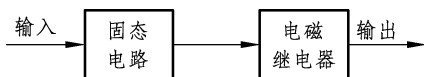


图 1.2.26 混合继电器原理框图

混合继电器结合了固态和电磁继电器的某些优点，也集合了二者的缺点。例如，混合继电器既具有固态电路易受温度和辐射影响的缺点，同时又存在电磁继电器所固有的触点弹跳、触点污染、动作慢等缺陷。

【学习体会】

通过本任务的学习，你都学到了什么？请写在下面。

【任务测评】

请根据所学知识，完成以下任务：

1. 接近开关与拨动开关相比有何特点？
2. 极化继电器有什么特点？
3. 双绕组接触器与普通单绕组接触器相比，其特点是什么？

【课程思政】

“铁面”中队长——张耀华

历经一天的忙碌，官兵们已有些疲惫，有的一上退场的大巴，就睡着了。此时，机棚一隅，一束手电光还在晃动着，一如往日，人员退场后，中队长张耀华举着手电复查战机铅封。

“这个打得有点松！重换一个。”碰上不如意的，他的语气里瞬间多了几分严肃，一旁的质控员连忙整改。这位中队长向来“铁面”，无形中自带气场，让人有点“怕”。

作为机务中队长，他需要牵头负责机务保障的大量工作。小到部件监控、数据填写，大到飞机定检，每个环节、每项工作，他都一丝不苟、严格把关。遇上棘手问题，更是亲自上手、带头研究。任务期间，他牵头编写了某新型战机《阅兵任务机务保障手册》，先后制定并完善 50 余条应急处置措施，确保了飞行安全和受阅顺利。从进驻准备到正式受阅，他们的飞机起动成功率 100%，任务成功率 100%，保障质量位居空

中梯队前列。

这个“铁面”中队长，性格中带着几分执拗和严苛，确实不太讨人“喜欢”。凡是认定的标准、交代的工作，绝不允许打折扣、搞变通、图省事。哪怕夏日酷暑难耐、冬日严寒刺骨、高原夜黑风高……当日事当日毕，质量标准绝不松。

多年以来，张耀华有个习惯——打一仗总结一次。他的工作包里一直装着两个本，一个本记录发动机故障研究，另一个作为飞机故障研究记录本。走到哪带到哪，遇到故障必记下。拉开他的办公桌抽屉，这样的本子，已经攒了满满一抽屉，大约有几十本。最早的记录，可以追溯到2010年他刚毕业才当机械师时。记录最频繁的一段，还是一次高原驻训期间。

那年深秋的任务中，高原机场低温、缺氧，给机务工作带来更多挑战。一些在原驻地不常见的问题，在这里接连发生。为此，张耀华连续加班，深入钻研发动机各系统原理、性能和参数匹配问题，写下了厚厚的研究笔记。

任务节奏紧张，每一次排故，都得和时间赛跑、分秒必争。一次，战机因故障紧急换发。新发动机装机后，试车检查发现尾喷口收放转速异常，几次更换部件、调整参数，始终无法根治，就连工厂专家也很无奈：“重新换装发动机吧！”可这样会影响次日的战备训练。张耀华不放弃，带着机组试了又试、调了又调、一遍又一遍开车。直到第9次调整，才达成最优匹配，参数全部达标，故障不再复现。而此时，已临近天亮。太阳升起，战机如期起飞、奔向“战场”。

入伍15年，张耀华随部队走南闯北，始终在外场守望战机升空、返航，一次次用行动践行着所在团队的团队精神——“让标准成为习惯，用学习成就梦想”。

引

自

:

https://www.xuexi.cn/lpage/detail/index.html?id=18319238272469528329&%20item_id=%2018319238272469528329

任务3 电路保护装置

知识目标

1. 掌握飞机电路保护装置的类型。
2. 掌握熔断器和断路器的结构特点。
3. 掌握熔断器和断路器的工作原理。

能力目标

1. 能区分熔断器、断路器等不同的概念。
2. 能描述熔断器和断路器的结构特点。

3. 能分析熔断器和断路器的工作原理。
4. 能正确使用工具，对熔断器和断路器进行拆装分解和连接。

思政目标

1. 养成“严谨细实”的机务作风，懂得“机务工作无小事”的道理。
2. 树立航空安全意识，具备团队合作精神。
3. 树立认真负责的工作态度，培养吃苦耐劳的精神。

【情境创设】

对于一架中大型固定翼无人机，飞机上的用电设备很多，导线也很长，通常以机体作为“地线”。如果使用不当，或者由于摩擦、振动等原因造成用电设备和导线的损伤，绝缘层遭到破坏，就容易出现短路。如果用电设备工作不正常，还可能出现电流长时间过载的情况。短路和长时间过载不仅会损坏导线和用电设备，造成供电中断，甚至引发火灾。为了避免此类事情的发生，飞机输电线路中设置了保护装置，下面就来学习吧。

【任务实施】

教师带领学生到停机坪进行参观，观察飞机上电路保护装置的分布情况。教师请学生对熔断器和断路器分布、不同点等进行分组讨论，告诉学生熔断器和断路器呈现形式多样，飞机上采用的方法是选用熔断器或断路器之类的电路保护装置。当电路发生短路或长时间过载时，保护装置能够自动将发生短路的负载或大过载的负载从电路中切除，从而保证电源的正常供电以及其他用电设备的正常工作。

知识点 1 熔断器

熔断器俗称保险丝，是一种仅有一次性分断功能的过流保护电器。它的主要构成元件是金属熔丝或熔片，串联在被保护的电路中。当被保护的电路发生长时间过载或短路故障时，熔丝就会发热到熔化温度而熔断，从而切断电路，起到保护电路的作用。熔断器结构简单、成本低廉，在飞机输配电系统和电子设备中被广泛应用。通常熔断器可分为易熔、难熔、惯性三类。

1. 易熔熔断器

易熔熔断器常用铜、银、锌、铅、锡等金属材料制成。飞机上的易熔熔断器的熔丝是装在玻璃管内的，玻璃管两头有金属插脚（或套管）插入专用的熔丝座内，如图 1.3.1 所示。这种熔丝的主要特点是熔丝惯性比较小，主要用来保护电路免遭短路的危害。因此，在过载能力比较小的用电设备电路中，常采用这类熔断器。这类熔断器的额定电流一般在 0.15 ~ 50 A。为了适应电子计算机、微型电子设备等需要，已有微电

流（如 0.002 A）规格的小型化保险丝。

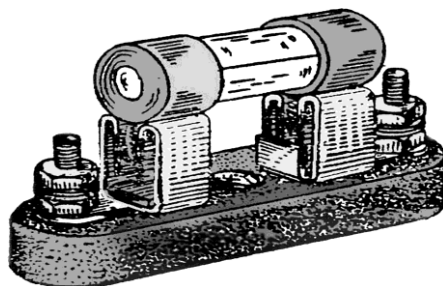


图 1.3.1 易熔熔断器

2. 难熔熔断器

难熔熔断器一般采用难熔金属铜作熔断片，在铜片（铜的熔点为 $1\ 083\ ^\circ\text{C}$ ）上挂上薄层锡（熔点为 $231.9\ ^\circ\text{C}$ ）。由于锡的熔点比铜低，在熔断片发热至锡的熔点时，便有一部分锡熔化并渗入到铜片中去，形成类似锡铜合金，其熔点比铜要低一些。在熔断片周围包有石棉水泥，可以吸收熔断片的一部分热量，增加熔断器的热惯性，使熔断片断开时产生的电弧迅速地熄灭。难熔熔断器对小电流不敏感，但在发生大电流短路时有明显的限流作用，主要用于飞机电源系统的短路保护。飞机常用的难熔熔断器外形如图 1.3.2 所示，其额定电流一般在 $200\sim 900\ \text{A}$ ，典型型号有 NB-100，NB-200 及 NB-300 等。

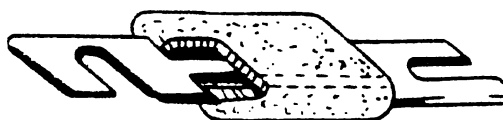


图 1.3.2 难熔熔断器外形

3. 惯性熔断器

飞机上的某些电气设备存在短时过载的情况，如电动机在起动的时候电流很大，而正常运行时电流则相对较小。如果采用易熔熔断器保护，则电动机无法完成正常起动；如果采用难熔熔断器保护，那么电动机虽然能够正常起动，但是如果电动机长时间过载就无法得到保护。这时就需要一种熔断器，它既能够承受短时间的过载，又能提供短路保护，这种熔断器称为惯性熔断器。惯性熔断器的内部结构如图 1.3.3 所示。

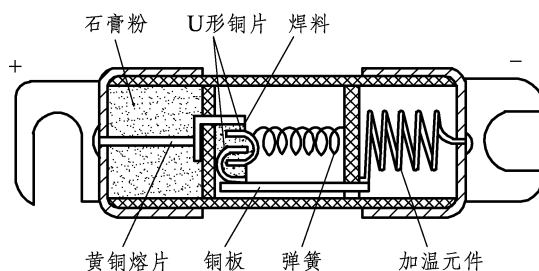


图 1.3.3 惯性熔断器的内部结构

这种熔断器的结构包括两部分：短路保护部分和过载保护部分。短路保护部分的熔化材料是黄铜熔片，它装在纤维管左隔腔内，被熄弧用的石膏粉或磷石灰粉包围着，黄铜熔片的熔断电流比额定电流大得多，它只在短路或过载电流很大时才能熔断。过载保护部分的熔化材料是低熔点焊料，它将两个 U 形铜片焊接在一起，其作用是在过载电流不是很大，但超过一定时间之后切断电路。熔化易熔焊料所需的热量，主要由装在纤维管右腔中的加温元件经质量较大的铜板供给。由于铜板的热容量和散热面积较大，故有较大的热惯性。

当有电流通过时，加温元件和黄铜熔片同时发热。在过载电流不很大的情况下，黄铜熔片由于其熔化电流比过载电流大，不会熔断；而易熔焊料则在经过一段时间后就会被熔化，焊料熔化后，弹簧把一个 U 形铜片拉开，电路就被切断。因为铜板有较大的热惯性，故易熔焊料达到熔化温度需要一定时间，这就使惯性熔丝具有较大的热惯性。在发生短路或过载特别严重的情况下，易熔焊料因铜板的热惯性较大不能立即熔化，而黄铜熔片则迅速熔断，切断电路。安装时需要注意极性，因为引起发热的是带负电的电子，过热加温元件接在负端。惯性熔断器常用在有起动性能要求的电路中，如电动机起动电路中，其额定电流一般为 5~250 A。

知识点 2 断路器

断路器又称自动保险电门 (Circuit Breaker, CB)，它是利用双金属片发热变形的原理，在短路和过载时自动切断电路，起到保护作用。具有按钮开关和保险丝双重作用，与熔断器不同的是，断路器可以复位 (假定故障已排除)。如图 1.3.4 所示，断路器在飞机上是一种通用的电路保护设备，一种小型按钮式的保险电门。传统跳开关的优势是很容易通过人工进行拔出或者按入跳开关来复位电路。这对维护工作来说非常重要。断路器的种类很多，按操作方式不同，一般可以分为扳动式断路器和按压式断路器两种。

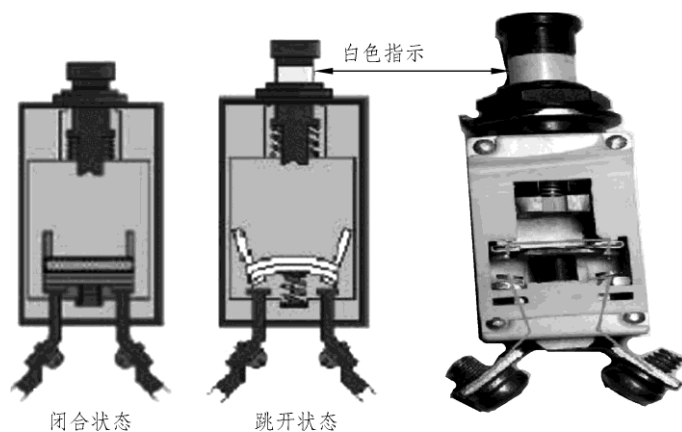


图 1.3.4 断路器

1. 扳动式断路器（自动保险电门）

飞机上采用的自动保险电门有非自由脱扣型（如国产 ZKC 型）和自由脱扣型（如国产 ZKP 型）两种，它们都属于扳动式断路器，具有扳动开关和过流保护的双重作用。其构造都是由开关结构和保护机构组成。

ZKC 型扳动式断路器是一种非自由脱扣保险电门，如图 1.3.5 所示。开关机构主要由手柄、拨板和触点组成；保护机构又称为双金属，主要由双金属片、挡板、复位弹簧、胶木滑块和固定于胶木滑块下的卡销组成。将手柄向左扳，活动触点与固定触点闭合，手柄上的三角形拨板带动胶木滑块向右移动，压缩复位弹簧，当胶木滑块下的卡销滑过双金属片上的挡板后，即被挡板卡住。这时，自动保险电门处于接通状态，工作电流通过左接线螺钉、接触点、双金属片、导线和右接线螺钉形成通路。以后再来回扳动手柄时，就只能控制接触点的通断，胶木滑块不能返回原位，而停在右边。这样，自动保险电门就起到开关作用。在保险电门接通情况下，若电路过载或短路，双金属片由于发热变形而向下弯曲。当双金属片弯曲到一定程度时，挡板脱离胶木滑块上的卡销，在复位弹簧的作用下，胶木滑块迅速左移，推动手柄而使触点断开，自动保险电门就起到保护电路的作用。

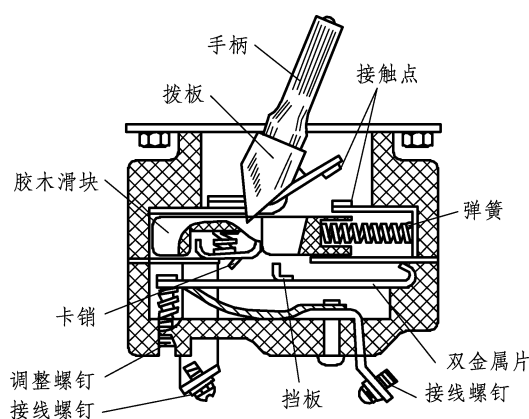


图 1.3.5 ZKC 型扳动式断路器结构

2. 按压式断路器（跳开关）

按压式断路器具有按钮开关和熔断器的双重作用，又称为跳开关，也称为按压式自动保险电门，其原理如图 1.3.6 所示。跳开关里面有双金属片，正常工作时，按下按钮，电路接通，使电源和负载接通。当接通的电路电流超过最大额定电流时，跳开关里面的双金属片受热元件受热后变形，压迫弹簧，使锁扣机构脱扣，从而断开电路连接，起到断流保护电路的作用。要注意的是，必须等双金属片降温恢复形状后，方可再次接通电路。这种按压式自动保险电门能够重复利用，但在出现跳开现象后必须排除原有故障，方可再次接通电路。在跳开关上还会标识不同的数字，数字代表了跳

开关工作的额定电流，当实际流过跳开关的电流超过这个阈值时，根据电流超限的大小，跳开关会立刻跳出或经过延迟后跳出。只有当双金属片恢复到原状时才可以复位，所以一般情况下建议在跳开关跳出后等 2 min 再复位。

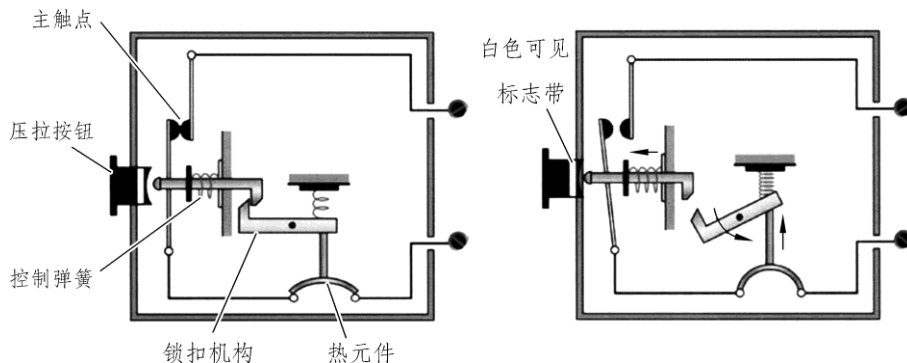


图 1.3.6 按压式断路器原理图

【学习体会】

通过本任务的学习，你都学到了什么？请写在下面。

【任务测评】

请根据所学知识完成以下任务：

1. 惯性熔断器的工作原理是什么？
2. 按压式断路器的组成部分有哪些？
3. 断路器的工作原理是什么？使用时需要注意什么？

【课程思政】

新中国航空先驱——徐昌裕的故事

徐昌裕，新中国航空工业和航空科研的创建人及领导人之一，抗日战争时期，在延安地区从事兵工生产和石油开发工作。抗日战争胜利后，参与创建我党第一所航校，为培养人民空军首批飞行员做出了贡献。中华人民共和国成立后，他主持领导飞机修理、制造、自行研制和科研工作，为推动我国航空工业和航空科研的发展，促进航空科技国际合作与交流以及培养航空科技人才做出了重要贡献。

徐昌裕淡泊名利，求真务实，一心钻研飞机行业技术，对工作一贯严谨、认真、细致。经常深入基层了解第一手情况，督促检查，及时发现和解决问题。他善于在推

进全面工作的同时，紧紧抓住不同阶段的工作重点和关键，采取有效措施，不断解决新问题，确保任务的顺利完成。

在航空工业建立初期，物质技术基础薄弱，飞机修理任务紧急而又繁重，困难很多，新调进的大批干部和工人都不懂飞机修理技术。徐昌裕面对现实，积极推动各飞机工厂采取多种形式，认真组织职工边干边学，并掀起学技术、学管理、学文化的热潮。他以身作则，带头学习俄语和钻研苏联飞机，特别是喷气式飞机的结构特点、制造工艺和管理方法。从而使工厂迅速掌握和提高了修理技术和管理水平。

当修理速度和水平普遍提高以后，由于苏联按原来比例供应的零备件不能适应实际需要，致使工厂因缺件而经常出现停工现象。徐昌裕便提出并指导工厂从小到大、由简到繁地开展零备件自制，并有意识地安排拟仿制机种的一些零部件进行试制，还实行了奖金制度，从而调动了各厂的生产积极性，既解决了零部件供不应求问题，又使修与造有机地结合了起来，为航空工业“走向制造”做了准备。

徐昌裕为我国航空事业奋斗了几十年，积极参与重大问题的决策。他参与组织领导飞机行业广大职工完成飞机修理和研制任务，成批生产了教练机、歼击机、强击机、轰炸机、运输机和直升机，逐步实现了我国空军、海军主力航空装备的国产化；他狠抓航空科研，使许多重要课题取得新的成果，自行研制出多种新机型；培养和锻炼出一支素质过硬的科研、设计、生产和管理队伍，为我国航空工业、航空科研，为国防和经济建设做出了重要贡献。